

Série A. — 841

N° D'ORDRE : 1640

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR M. ANDRÉ CORNU-THÉNARD

ANCIEN INGÉNIEUR DES MANUFACTURES DE L'ÉTAT

1^{re} THÈSE. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LES ESSAIS AU CHOC DES BARREUX
ENTAILLÉS.

2^e THÈSE. — MÉTHODES DE DOSAGE DES GAZ DANS LES ACIERS : HYDROGÈNE,
OXYGÈNE ET AZOTE.

Soutenues le 7 juillet 1920, devant la Commission d'examen

MM. LIPPMANN, *Président.*
KOENIGS, } *Examineurs.*
H. LE CHATELIER, }

ANGERS

IMPRIMERIE F. GAULTIER ET A. THÉBERT

4, RUE GARNIER, 4

1920

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen. F. HOUSSAY, *Professeur*, Zoologie.

Professeurs honoraires. { P. PUISEUX.
VÉLAIX.
BOUSSINESQ.

Professeurs

LIPPMANN Physique.
BOUTY Physique.
E. PICARD Analyse supérieure et algèbre supérieure.
Y. DELAGE Zoologie, anatomie, physiologie comparée
Gaston BONNIER Botanique.
KOENIGS. Mécanique physique et expérimentale.
GOURSAT Calcul différentiel et calcul intégral.
HALLER. Chimie organique.
JOANNIS. Chimie (Enseignement P. C. N.)
JANET. Physique.
WALLERANT Minéralogie.
ANDOYER Astronomie.
PAINLEVÉ Mécanique rationnelle.
HAUG Géologie.
H. LE CHATELIER. Chimie
Gabriel BERTRAND Chimie biologique.
M^{me} P. CURIE Physique générale.
CAULLERY. Zoologie (Evolution des êtres organisés).
C. CHABRIÉ Chimie appliquée.
G. URBAIN. Chimie
Émile BOREL Physique mathématique et calcul des probabilités.
MARCHIS Aviation
Jean PERRIN Chimie physique.
G. PRUVOT. Zoologie, anatomie, physiologie comparée.
MATRUCHOT. Botanique
ABRAHAM Physique.
CARTAN. Calcul différentiel et calcul intégral.
Ch. GUICHARD Géométrie supérieure.
MOLLIARD. Physiologie végétale.
LEBESGUE. Application de l'analyse à la géométrie
LAPICQUE. Physiologie.
CENTIL. Géographie physique.
VESSIOT. Mathématiques générales.
N Histologie.
N Physiologie théorique et Physique céleste.

Professeurs adjoints.

{ LEDUC. Physique.
HÉROUARD. Zoologie.
LÉON BERTRAND Géologie
RÉMY PERRIER Zoologie (Enseignement P. C. N.).
COTTON. Physique.
LESPIEAU Chimie.
SAUGNAC. Physique (Enseignement P. C. N.).
PEREZ Zoologie (Evolution des êtres organisés).

Secrétaire D. TOMBECK.

Série A. — 841

N° D'ORDRE : 1640

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR M. ANDRÉ CORNU-THÉNARD

ANCIEN INGÉNIEUR DES MANUFACTURES DE L'ÉTAT

1^{re} THÈSE. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LES ESSAIS AU CHOC DES BARREAUX
ENTAILLÉS.

2^e THÈSE. — MÉTHODES DE DOSAGE DES GAZ DANS LES ACIERS : HYDROGÈNE,
OXYGÈNE ET AZOTE.

Soutenues le

1920, devant la Commission d'examen



MM. LIPPMANN,

Président.

KOENIGS,

H. LE CHATELIER, }

Examineurs.

ANGÈRS

IMPRIMERIE F. GAULTIER ET A. THÉBERT

4, RUE GARNIER, 4

1920



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554011_0003

Étude expérimentale sur les essais au choc des barreaux entaillés

o o o o o

PRÉLIMINAIRES

Si la plupart des savants et des techniciens ont entrevu, dès leur apparition, le rôle considérable que les essais au choc sur entaille étaient appelés à jouer dans la pratique, il n'en est pas moins vrai que cette catégorie d'épreuves est restée longtemps presque exclusivement un sujet de recherches de laboratoire, sans être admise, au même titre que les essais de traction, de dureté, de pliage, etc..., à figurer normalement dans les cahiers des charges.

Tous les métallurgistes, cependant, s'accordaient à reconnaître la puissance de ce moyen d'investigation et l'importance des renseignements qu'il était capable de donner sur la qualité de la matière métallique, surtout en ce qui concerne les traitements thermiques subis, renseignements qui ne pouvaient être fournis par aucune autre épreuve usuelle. Mais, l'irrégularité, on peut même dire l'incohérence apparente, des résultats obtenus, était faite pour encourager la routine ou lasser les meilleures volontés.

Il a fallu que se manifestent les impérieuses exigences de la Défense Nationale pour faire passer brutalement les essais au choc sur entaille du domaine de la spéculation dans celui de l'application. Lorsque, en effet, les services de l'Aviation Militaire eurent à préciser les spécifications des aciers réservés à la construction des pièces essentielles des moteurs d'aréoplanes, ils

furent contraints d'imposer aux métallurgistes, en même temps que des conditions de limite élastique, de limite à la rupture, etc..., des conditions de non fragilité que seule la résilience permettait de chiffrer. C'est ainsi que, à partir de 1917, la réception des vilebrequins pour avions comportait une épreuve individuelle au choc sur entaille : la nécessité avait obligé les techniciens à résoudre un problème, qui, quelques mois auparavant, paraissait inabordable.

Nous avons pensé qu'il serait intéressant, dans ces conditions, de chercher à préciser le mécanisme d'un phénomène, qui, par certains côtés, reste encore assez mystérieux : les applications innombrables qu'on en a faites ces temps derniers et les services importants qu'on est en droit d'en attendre dans la suite, semblent légitimer ce point de vue.

Avant de passer à l'exposé des résultats de notre étude, exposé qui constitue la deuxième partie de ce mémoire, nous indiquerons successivement, dans la première partie, l'historique sommaire de l'épreuve de flexion au choc sur entaille, le but de nos recherches et le programme de nos expériences, enfin les méthodes et le matériel adoptés dans nos essais. La troisième et dernière partie présentera les conclusions générales que nous croyons pouvoir tirer de nos observations.

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE I. — Indications historiques.

CHAPITRE II. — But de l'étude et programme des recherches.

CHAPITRE III. — Description des Méthodes et du Matériel adoptés.

CHAPITRE I

INDICATIONS HISTORIQUES

Si l'on peut reporter à une date très lointaine l'apparition des premiers essais au choc sur entaille dans la technique métallurgique, il semble bien, malgré les efforts des Allemands (1) pour s'en faire attribuer la paternité, que l'idée de mesurer le travail de rupture, principe même de l'épreuve telle qu'elle est exécutée actuellement, soit due à M. André Le Chatelier. Les premières expériences de cet éminent Ingénieur sont signalées, dès le 6 novembre 1892 par M. Considère (2), qui faisait ressortir l'importance pratique considérable des résultats obtenus et le prix des renseignements qu'on était en droit d'attendre de la nouvelle épreuve.

L'historique des très nombreuses recherches dont les travaux de M. André Le Chatelier ont été le point de départ, a fait l'objet, à différentes époques, de publications intéressantes : on peut, en particulier, assister à la période de gestation de l'essai de choc dans la réunion des Mémoires originaux que la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale a fait paraître, en 1904, sous le titre de « Contribution à l'étude de la fra-

gilité dans les fers et les aciers » ; puis suivre les étapes successives de la mise au point de l'épreuve dans les Comptes Rendus des Congrès de l'Association internationale pour l'essai des matériaux. Il serait donc superflu de refaire ici une histoire complète, qui ne pourrait être que la répétition de documents existants : nous nous bornerons, en conséquence, à donner une vue d'ensemble de la question, telle qu'elle nous paraît se présenter à l'heure où nous écrivons ces lignes et nous indiquerons succinctement les différents matériels employés ainsi que les divers ordres de recherches auxquelles la mise au point de l'essai a donné naissance.

A) APPAREILS DE CHOC. — Nous croyons devoir présenter ici les types les plus usuels des machines de choc, car nous aurons à indiquer, dans la suite, pourquoi nous avons choisi un instrument plutôt que les autres, qui étaient cependant aussi à notre disposition.

1° *Différents types d'appareils.* — Les appareils actuellement employés dans les Laboratoires, peuvent se classer en 3 catégories principales : moutons verticaux, moutons pendules et moutons rotatifs.

Le mouton vertical, le plus ancien en date, a servi à M. André Le Chatelier pour ses premières expériences. Ce savant métallurgiste procédait par coups répétés à partir d'une hauteur de chute fixe et définissait la résistance du métal à

(1) Voir Rudeloff, *Stahl und Eisen*, Avril 1902. Traduction de M. Pierre Breuil, *Revue de Mécanique*, Août 1902.

(2) Rapport présenté à la Commission française des Méthodes d'essais.

l'essai par le nombre d'impacts supportés par le barreau, avant de se briser.

Ce mode opératoire fut modifié, en 1893, par M. Barba (puis, en 1894, par M. Auscher) qui recherchait par tâtonnements successifs, la plus grande hauteur de chute d'un poids connu à laquelle l'éprouvette pouvait résister, et la plus petite hauteur entraînant la cassure : ces résultats permettaient de calculer la « hauteur de rupture moyenne » caractéristique de l'expérience.

Le premier procédé avait l'inconvénient de produire, derrière l'entaille, des écrouissages successifs dont il n'était pas possible de tenir compte : le second, forçait de pratiquer beaucoup d'entailles et de mettre en œuvre un poids notable de métal pour un résultat unique : l'un et l'autre, enfin, nécessitaient, pour obtenir une mesure, l'exécution d'un nombre assez considérable de chutes, d'où une perte de temps appréciable.

Pour pallier à ces divers inconvénients, M. Frémont imagina, en 1897, d'exprimer la force vive restante du mouton, après rupture de l'éprouvette, en fonction de l'écrasement d'un crusher ou de la compression d'un ressort : il suffisait, ici, d'une seule chute de la masse, pour déterminer, par différence, le travail de rupture. Le dispositif ingénieux de M. Frémont fut modifié dans la suite par MM. Barba et Le Blant, qui mesurèrent la force vive restante de la masse par la hauteur du rebondissement de celle-ci sur un ressort taré.

Nous aurons passé en revue les modes d'emploi les plus usuels des machines verticales, quand nous aurons signalé l'enregistrement, sur un tambour tournant, de la trajectoire du mouton au voisinage de l'impact : ce dispositif qui a été adapté par M. Amsler, de Schaffhouse, à ce genre de machines, permet par une construction et un calcul simples, de donner la valeur numérique du travail absorbé par la rupture.

Le principe des Moutons-pendules a été suggéré en 1897 par un Ingénieur Américain, M. Russel : mais la réalisation pratique en a été faite par M. Charpy, qui, dès 1901, présentait un

modèle de l'appareil très voisin du modèle actuel, et indiquait un mode opératoire, auquel il n'a été apporté, depuis, que des modifications de détails.

Le mouton-pendule est constitué essentiellement par une masse oscillante, qui, abandonnée à partir d'une position initiale déterminée, vient frapper, en passant par la verticale, le barreau à essayer reposant sur deux appuis, le casse, et remonte à une hauteur d'autant plus grande que le travail absorbé par la rupture de l'éprouvette est plus petit. La mesure du travail de rupture se déduit donc de la lecture de 2 angles, l'angle de départ et l'angle de remontée.

Les moutons rotatifs ont été imaginés et mis au point par M. Guillery : dans ces appareils, la barrette, placée horizontalement sur ses appuis, est introduite brusquement sur le trajet d'un couteau fixé à la périphérie d'un volant qui tourne, dans un plan vertical, à une vitesse suffisante pour provoquer la rupture. La variation de la force vive du volant, correspondant au travail de rupture de l'éprouvette, est enregistré par le déplacement d'une colonne d'eau en relation avec une petite pompe centrifuge à axe vertical, fonctionnant comme tachymètre.

2° *Organes communs à tous les appareils de choc.* — Qu'il soit vertical, rotatif, ou pendulaire, un appareil de choc présente de toute nécessité :

des appuis, susceptibles de supporter le barreau et de le fixer à sa position avant exécution de l'expérience, puis de s'opposer à sa projection et de provoquer sa flexion au moment de l'impact ;

et un couteau, organe de transmission du choc.

Il est bien évident que, indépendamment de l'identité des barreaux employés, la comparabilité des résultats d'un laboratoire à l'autre, exige l'identité des appuis et des couteaux. Le Congrès de New-York (1912) de l'Association Internationale pour l'essai des Matériaux, avait bien remarqué l'importance de ce point de vue et avait

inscrit, entre autres questions, au programme des études de sa Commission n° 26 (chargée de la standardisation de l'essai de choc sur entaille), les définitions de la distance des appuis, des arrondis de ces appuis dans leurs parties en contact avec le barreau pendant l'essai, du couteau et de l'arrondi formant le nez de ce couteau.

Malheureusement, le Congrès qui devait trancher ces différents points ne put se tenir, à Péetrograd, en 1915, du fait des hostilités, et les solutions attendues ne sont pas intervenues.

Il faut bien reconnaître, d'ailleurs, que la plupart des Métallurgistes semblent ne pas attacher une grande importance à ces détails de construction de leurs machines. Si, en effet, la distance des appuis est assez généralement fixée à 120 m/m pour les barreaux de 30 × 30 et à 40 m/m pour les barrettes 10 × 10, la définition des arrondis est, le plus souvent, complètement négligée, et les expérimentateurs ne signalent même pas, dans leurs mémoires, les formes adoptées par eux. En l'absence de documents traitant de ces différents points, nous nous sommes borné à appliquer, dans ce nouveau travail, les conclusions auxquelles nous avait conduit une étude antérieure (1).

3° *Caractéristiques principales de construction des appareils.* — Le Congrès de New-York (1912) soulignant l'importance pratique qu'il attachait à la solution de ces questions, avait prévu que l'Assemblée suivante présenterait des propositions bien définies pour la hauteur de chute et le poids du mouton.

Faut-il, en effet, pour obtenir des résultats comparables, déterminer rigoureusement la vitesse d'impact et la masse frappante, ou peut-on les laisser arbitraires, à condition, toutefois, d'obtenir, en un coup, la rupture des éprouvettes soumises à l'essai? Les techniciens sont loin d'être d'accord sur ces principes fondamentaux, et il nous suffira, pour donner une idée des di-

vergences d'opinion qui se manifestent sur ces points, de citer deux auteurs différents : l'un, M. Frémont (1), adoptant la manière de voir la plus généralement admise, résume ses essais personnels en écrivant : « la fragilité ne se montre, d'habitude, qu'à partir d'une certaine vitesse d'impact » ; l'autre, M. Bélanger (2), exprime le point de vue opposé en concluant : « La résilience vraie, c'est-à-dire celle obtenue quand le mouton tombe de la hauteur strictement nécessaire pour provoquer la rupture de l'éprouvette, est toujours plus petite que celle observée quand le mouton tombe d'une hauteur très supérieure ».

La question, qui n'a pu être soumise au Congrès de Péetrograd en 1915, paraît n'avoir pas été reprise depuis 1912, en dehors des recherches effectuées par M. Charpy et par nous (3) : cette étude nous avait conduits à conclure que, dans le cas des métaux traités pour emplois usuels, l'influence de la hauteur de chute et du poids du mouton était pratiquement négligeable, dans les limites où ces facteurs sont modifiés, par les constructeurs, d'un type d'appareil à l'autre.

B) *BARREAUX.* — Bien que le Congrès de Copenhague, de l'Association Internationale pour l'Essai des Matériaux, reproduisant les décisions du Congrès de Berlin (octobre 1907) de l'Association Allemande des Méthodes d'essais, ait défini de façon précise deux types de barreaux entaillés,

barreau de 30 × 30 × 160 mm. avec entaille ronde de 4 mm. de diamètre, à mi-épaisseur,

barreau semblable de 10 × 10 × 53,3 mm., avec entaille ronde de 1,3 mm. de diamètre, à mi-épaisseur,

l'ensemble des métallurgistes ne semble pas avoir accepté ces suggestions, tout au moins en ce qui concerne les entailles.

Pour le petit barreau, par exemple, on prend

(1) Ch. Frémont : *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*. Février 1901.

(2) Compagnie des Chemins de fer P.-L.-M. Rapport au Congrès de New-York de l'Association internationale pour l'essai des matériaux 1912).

(3) Georges Charpy et André Cornu-Thénard : Nouvelles expériences sur les Essais de Choc, *Revue de Métallurgie*, n° 2, 1917.

(1) Georges Charpy et André Cornu-Thénard : Note sur un procédé de tarage des appareils d'essai des métaux par choc, *Revue de Métallurgie*, n° 11, 1913 (page 1233).

le plus souvent une section de 10×10 mm. ; M. Frémont, cependant, a décrit et utilisé une éprouvette de 10×8 qui est assez répandue, mais dont la longueur, suivant les expérimentateurs, varie de 53,3 à 60 mm. Quant au mode d'entaillage, il est si fantaisiste qu'il est absolument impossible, dans l'état actuel des choses, de comparer les résultats obtenus, à l'essai de choc, d'un laboratoire à l'autre.

On peut, à ce propos, classer les types d'entailles normalement employés en 3 catégories principales :

L'entaille ronde (celle de Copenhague), qui a été proposée par M. Charpy et qui consiste en un orifice cylindrique, pratiqué au foret, puis débouché, à la scie, vers l'extérieur du barreau,

L'entaille aigüe, qui peut être exécutée à la fraise ou à l'outil de rabotage, ou seulement ébauchée à l'aide d'un de ces deux outils et terminée à la presse par enfoncement d'un coin, suivant les modes opératoires décrits par MM. Barba et Auscher,

le trait de scie, de 1 mm. de largeur, préconisé par M. André Le Chatelier, puis par M. Frémont.

Si l'on considère que rien n'empêche de fixer arbitrairement la profondeur de chacun de ces types d'entailles, le diamètre des entailles rondes, l'angle et l'arrondi terminal des entailles aigües, on conçoit aisément le nombre de profils particuliers auxquels l'imagination des expérimentateurs a pu donner naissance.

Il faut, toutefois, reconnaître que des efforts sérieux ont été faits pour améliorer une situation qui pouvait, à priori, paraître inextricable. Comme entaille ronde pratiquement employée, on ne compte plus guère que le type Charpy (Congrès de Copenhague) ci-dessus défini, et le type Mesnager, de 2 mm. de diamètre, à 2 mm. de profondeur ; ce dernier, en particulier, a été introduit, au cours des hostilités, dans ses Cahiers des Charges, par le Service Technique des Fabrications de l'Aviation. Les entailles aigües restent assez

peu précisées : néanmoins, on a standardisé, en Angleterre, le profil à 45° , terminé par un arrondi de 0,25 mm. de rayon, à une profondeur de 2 mm. Pour le trait de scie, on s'en tient, le plus communément, à la disposition préconisée par M. Frémont (1 mm. de largeur et 1 mm. de profondeur, sur barreau de 10×8 mm.).

L'influence de la forme de l'entaille sur les résultats de l'essai de choc a été étudiée par un grand nombre de métallurgistes. Ils s'accordent, en général, à reconnaître que les travaux de rupture exprimés par l'épreuve sont d'autant plus petits, que, toutes choses égales, l'entaille est plus profonde et que, à égalité de profondeur, le fond de l'entaille est plus aigü. Nous avons indiqué ces différents points dans notre travail antérieurement cité (1). MM. Stanton et Balson (2) sont arrivés aux mêmes conclusions dans une première série d'essais où ils faisaient intervenir des entailles Charpy et des entailles en V terminées par un angle vif ou par des arrondis de rayons divers. A la suite d'une seconde série d'essais, M. Stanton (3) a montré que pour mettre en évidence, avec sécurité, les défauts des traitements thermiques, les entailles superficielles en V (profondeur de 2 mm. et angle de 45°) ne devaient pas présenter un arrondi terminal de plus de 0,25 mm. de rayon. Enfin, des expériences sont entreprises à l'heure actuelle, par des commissions française et anglaise, pour établir la comparaison entre l'entaille Mesnager et l'entaille Standard en V.

C) DIVERS ORDRES DE RECHERCHES. — En dehors des travaux si considérables et si nombreux que la mise au point du matériel de choc a suscités, et dont nous venons de donner une idée d'ensemble succincte, il existe un vaste domaine de recherches que ce matériel permet d'aborder.

C'est, tout d'abord, la définition de la fragilité

(1) Georges Charpy et André Cornu-Thénard, *loc. cit.*, pages 106 et suivantes.

(2) Rapport annuel du National Physical Laboratory, *Engineering*, 22 Juin 1917.

(3) Rapport annuel du National Physical Laboratory, *Engineering*, 26 Juillet 1918.

métallique elle-même (1), question des plus ardues, qui semble n'avoir pas fait grands progrès depuis les premières idées émises à son sujet par MM. André Le Chatelier, Considère, Brustlein, etc...

Si la définition de la fragilité n'est pas encore précisée de façon satisfaisante, il est cependant possible d'indiquer les conditions susceptibles d'agir sur la résilience d'un métal : on a reconnu, par exemple, qu'un acier d'analyse déterminée, absorbait, avant de rompre à l'essai de flexion sur entaille, un travail beaucoup plus considérable s'il était traité convenablement que s'il était maintenu à l'état brut de forge. On a reconnu, d'autre part, que la modification des compositions chimiques, et, en particulier, les additions judicieuses de chrome et de nickel, permettaient de réaliser des alliages ferreux à haute résistance présentant un travail de rupture sur entaille relativement très élevé.

Les investigations ont porté également sur l'influence de la température, les relations entre l'épreuve au choc sur entaille et les essais mécaniques usuels, etc...

Nous n'insisterons pas sur l'historique de ces recherches, malgré tout l'intérêt des mémoires qui en traitent, et nous nous bornerons, en terminant ce rapide exposé, à examiner de plus près, une question particulière, sur laquelle nous avons l'intention de nous étendre au cours de ce travail : c'est la loi de similitude.

Le choix des 2 types de barreaux rigoureusement semblables, préconisés par le Congrès de Copenhague, avait eu pour cause déterminante les conclusions d'une note de M. Révillon, d'après lesquelles les résiliences obtenues sur de

telles éprouvettes étaient égales, pour un même métal et pour une même machine de choc.

Malheureusement, les résultats de M. Révillon ne furent pas confirmés par les nombreux essais exécutés ultérieurement dans les laboratoires français et étrangers. La plupart des expérimentateurs, en effet, s'accordèrent à reconnaître, et l'on peut considérer ce point comme acquis, que les résiliences fournies par les barreaux de 10×10 sont toujours plus faibles que les résiliences fournies par les barreaux de 30×30 , la différence s'accroissant quand la valeur absolue de la résilience augmente.

Une façon de voir nouvelle était apportée, en 1911, par le Capitaine Mimey (1) : des considérations théoriques avaient amené cet éminent technicien à penser (et c'est là l'expression de la loi de similitude sous la forme qui lui est donnée le plus généralement) que les déformations de deux barreaux de flexion B_1 et B_2 , entaillés ou non, géométriquement semblables suivant le rapport de similitude α , absorberaient des travaux T_1 et T_2 qui seraient entre eux comme le cube des dimensions homologues, si les masses frappantes M_1 et M_2 des moutons, les hauteurs de chute H_1 et H_2 et les distances des appuis D_1 et D_2 vérifiaient respectivement les conditions.

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}} = \frac{D_1}{D_2} = \alpha.$$

Nos essais de 1913 et 1914 (2) n'ont pas confirmé le point de vue du Capitaine Mimey, tout au moins dans le cas des métaux mis en œuvre au cours de nos recherches. Depuis lors, la question ne paraît pas avoir été reprise, malgré tout l'intérêt pratique qu'elle présente.

(1) Voir à ce sujet : Henry Le Chatelier, Essais de fragilité au choc sur barreaux entaillés, Congrès de Budapest de l'association internationale pour l'Essai des Matériaux (1901) et Georges Charpy, Essais des métaux par choc. Congrès de Copenhague, de l'Association internationale pour l'Essai des Matériaux (1909).

(1) Capitaine Mimey : Notes sur les Essais de choc, *Revue d'Artillerie* (Juillet 1911).

(2) Georges Charpy et André Cornu-Thénard, *loc. cit.* p. 103 et suivantes.

CHAPITRE II

BUT DE L'ÉTUDE ET PROGRAMME DES RECHERCHES

Dans son important mémoire sur les Essais des Métaux (1), M. Pierre Breuil écrit : « Les différences constatées pour des métaux, qui se sont montrés identiques à l'essai de traction ordinaire, apparaissent, avec les barreaux de flexion entaillés, sollicités aussi bien statiquement que dynamiquement. C'est donc l'entaillage qui régit le phénomène et non pas le choc. » C'est cette dernière phrase que nous nous proposons de discuter dans ce nouveau travail, en formulant le problème de la façon suivante : « Est-ce à l'entaillage, est-ce au choc, est-ce à l'ensemble de l'entaillage et du choc qu'est due la mise en évidence de cette propriété, encore mal définie, qu'on est convenu d'appeler fragilité ».

La question ne nous paraît pas, en effet, être aussi simple que M. Breuil se plaît à la présenter : nous n'en voulons pour preuve que l'extrême diversité des opinions qui ont cours dans le monde des Métallurgistes, comme l'historique sommaire du chapitre précédent l'a fait ressortir. Si la vitesse d'impact intervient de façon prépondérante, à ce qu'affirment certains techniciens, il ne faut pas ignorer délibérément son influence. Si, d'autre part, l'entaillage régit le phénomène, comment se fait-il qu'on rencontre, dans la pratique, un nombre aussi considérable d'entailles, qui fournissent des résultats peu comparables, parfois même incohérents. Nous n'avons pas cru, en conséquence, pouvoir disjoindre les 2 facteurs, vitesse et entaillage, et c'est pourquoi la proposition tirée du Mémoire de M. Breuil sous la forme que nous lui avons donnée, nous a paru légitimer de nouveaux travaux, dans le but, non pas de définir de façon rigoureuse le type de barreaux à mettre en œuvre à l'exclu-

sion de tous les autres, mais seulement, de mettre en évidence ceux de ces types qui, à notre avis, devraient être éliminés, parce qu'ils conduisent à des déterminations incertaines, ou même erronées.

Dans ces conditions, la collection des observations à rassembler pour mener à bien ces recherches, se répartit naturellement en deux groupes distincts, qui peuvent éventuellement se pénétrer l'un l'autre : influence de la vitesse et influence de l'entaillage.

Pour étudier l'influence de la vitesse, entre les limites les plus larges que fournissent les ressources habituelles des laboratoires, nous cassons des barreaux, tantôt sur des appareils de choc mettant en jeu les hauteurs de chute usuelles les plus élevées, tantôt sur des machines à traction ordinaires, actionnées très lentement, à la main. La vitesse du couteau, au moment où il vient en contact avec le barreau, varie ainsi de 9 m. par seconde à 60 mm. par heure, nombres qui sont dans le rapport de 10^5 à 1 environ.

Le phénomène, dans le cas de la sollicitation lente, étant constamment accessible, nous l'étudions avec soin, en vue d'en tirer, le cas échéant, des enseignements relatifs au mécanisme du choc. Nous sommes ainsi conduit à ne pas considérer seulement les travaux de rupture dans l'un et l'autre mode d'essai, mais à comparer entre elles les déformations successives subies par les barreaux, quand on leur fait absorber, brusquement ou progressivement, une même quantité de travail. Il est bien évident que, si, d'une part, les travaux de rupture et, d'autre part, les déformations successives dues aux sollicitations vive ou lente, sont analogues, on peut conclure que les mécanismes de rupture mis en jeu dans les deux épreuves sont comparables, et que les observations, faites dans le cas le plus favorable, sont applicables à l'autre. Dans cette hypothèse, l'influence de la vitesse peut être considérée comme pratiquement négligeable.

Si, au contraire, les deux phénomènes se distinguent nettement, tant par leur expression numérique globale que par l'allure générale des pé-

(1) Pierre Breuil : Nouveaux mécanismes et nouvelles méthodes pour l'essai des Métaux. Extrait de la *Revue de Mécanique*, 1910, page 227.

riodes successives qui les constituent, il convient en cherchant une interprétation scientifique de ces résultats, d'examiner quelle valeur minima il faut donner à la vitesse, pour que l'essai fasse, avec certitude, apparaître la fragilité.

Pour étudier l'influence de l'entaille, nous en faisons varier successivement les caractéristiques principales, et nous comparons entre elles les déterminations obtenues. Il ne s'agit pas, d'ailleurs, ici, de montrer que l'entaille est nécessaire à la mise en évidence de la fragilité ; le fait est bien connu : mais seulement de préciser les conditions dans lesquelles il doit être exécuté pour qu'il joue, en toute sécurité, le rôle qui lui est attribué.

Pour expliquer l'expression « pratiquement négligeable » que nous avons employée plus haut et qui reviendra, dans la suite, fréquemment, sous notre plume, nous ne tarderons pas davantage, à opposer l'un à l'autre, les deux points de vue auxquels nous nous placerons dorénavant, en examinant les résultats de l'influence des deux facteurs envisagés sur l'essai de flexion. Au point de vue *scientifique*, nous nous attachons à définir le sens et la valeur numérique des modifications que les variations de la vitesse et de l'entaille font subir au phénomène de rupture ; au point de vue *pratique*, au contraire, nous considérons ces modifications comme négligeables lorsqu'elles ne troublent pas le classement des métaux, les uns par rapport aux autres, dans l'échelle des résiliences.

Ces observations d'ordre général étant faites, passons à l'examen de certaines conditions de réalisation.

Après quelques essais préliminaires, nous avons jugé opportun de faire porter les expériences relatives à l'étude de la vitesse sur des barreaux de grandes dimensions, de façon à soustraire les mesures, autant qu'il était possible, à l'influence des hétérogénéités locales accidentelles, qui affectent d'autant plus les résultats que les sections utiles sont plus faibles. Nous avons cependant, à titre de confirmation, répété les déterminations sur des éprouvettes de 10×10 mm.,

et sur des barreaux de formes qui sont le plus couramment usitées.

Pour l'étude de l'entaille, au contraire, on n'a mis en œuvre que des barrettes de 10×10 , le caractère démonstratif des essais préliminaires ayant paru satisfaisant, et ce matériel ayant, sur l'autre, l'avantage de réduire considérablement la consommation du métal.

A condition de rendre géométriquement semblables les deux types d'éprouvettes que les considérations précédentes nous ont amené à employer, nous avons pu, sans expériences nouvelles, et par un simple regroupement des résultats obtenus, examiner les possibilités d'application de la loi de similitude aux épreuves de flexion sur entaille : il nous a paru intéressant, en effet, de profiter des nombreuses déterminations auxquelles notre programme nous astreignait, pour chercher à élucider cette question, dont la solution, dans un sens favorable, rendrait des services importants aux Métallurgistes.

Le but de notre étude et le programme de nos recherches étant ainsi déterminés, nous sommes en mesure de préciser l'ordre que nous suivrons dans le compte-rendu des résultats obtenus.

Nous commencerons, évidemment, par décrire le matériel adopté et les modes opératoires suivis, tant pour l'essai au choc, comportant l'expérience poussée jusqu'à la rupture et l'expérience arrêtée à une période déterminée de la déformation, que pour l'épreuve par action lente, au cours de laquelle nous faisons une série d'observations qu'il importe de définir avec soin. Ces indications, considérées comme préliminaires, font l'objet du 3^e chapitre de la 1^{re} partie de cet exposé.

Le compte-rendu des déterminations elles-mêmes forme la 2^e partie de ce mémoire ; cette 2^e partie se trouve naturellement divisée en 3 chapitres, traitant, chacun, des trois sujets que nous nous proposons d'aborder : vitesse, entaille, et similitude.

Le 1^{er} chapitre est consacré aux métaux, choisis aussi différents que possible les uns des autres, mais tous traités pour emploi usuel : c'est le cas pratique le plus général.

Le 2° chapitre fait intervenir les mêmes aciers ou du moins un certain nombre d'entre eux, mais à l'état recuit : c'est un cas particulier qui, au point de vue technique, ne devrait pas être rencontré, dans l'usage courant, pour les pièces de quelque importance (pour lesquelles, seules, l'essai de résilience doit être envisagé) mais qui, cependant, présente des applications trop fréquentes.

Quant au 3° chapitre, il est réservé à l'examen d'un cas tout à fait exceptionnel, celui de l'acier extra-doux cristallisé à gros grains, qui se comporte d'une façon très particulière, en opposition avec tous les métaux étudiés jusque-là. Si l'on considère que l'extra-doux est, d'une part, le métal à tôle de chaudières et le métal réservé à la cémentation, que, d'autre part, il se rapproche singulièrement de l'acier dit de construction, le plus communément employé de tous les produits sidérurgiques, on conçoit l'importance des observations auxquelles il a pu donner lieu.

Nous terminons par l'exposé des conclusions auxquels nous croyons avoir été conduit par nos recherches : c'est la 3° et dernière partie de ce travail.

CHAPITRE III

DESCRIPTION DES MÉTHODES ET DU MATÉRIEL ADOPTÉS

Avant de présenter les résultats des déterminations que comporte la réalisation du programme de recherches défini au chapitre précédent, il nous faut préciser, d'une part les types de machines et d'éprouvettes utilisées en indiquant les raisons qui ont motivé le choix de ces types, d'autre part, les méthodes adoptées pour l'exécution des expériences, et enfin les différents métaux qui ont été mis en œuvre. Tels sont les points que nous nous proposons d'aborder dans le présent chapitre.

A) APPAREILS DE CHOC. — *Choix et description de l'appareil.* — Le type de l'appareil, sous réserve de sa bonne construction et de sa parfaite comparabilité avec lui-même ayant été reconnu indifférent (1), nous avons adopté, comme machine d'essai au choc, le Mouton-Pendule Charpy, et ceci, pour les raisons suivantes :

1° L'expression du travail absorbé est fournie par la différence de valeur de deux phénomènes identiques (remontées pendulaires) et ne fait intervenir, pour la détermination de la force vive restante après le choc, aucun dispositif accessoire de nature différente (élasticité de ressorts, écrasement de crushers, inscription de variation de vitesse, etc...), nécessitant une interprétation ou un calcul supplémentaire.

2° Le mouvement du pendule autour de son axe de suspension étant réalisé au moyen de roulements à billes soigneusement ajustés, l'influence des frottements mécaniques est réduite au minimum, et elle reste identique à elle-même, dans le temps, autant qu'il est possible : une expérience préalable simple, décrite plus bas, permet, d'ailleurs, de déterminer, pour chacun des angles de remontée, la valeur des frottements ainsi que de la résistance de l'air. Dans ces conditions, connaissant les caractéristiques de l'instrument (poids de la masse oscillante, position du centre de gravité et longueur du pendule simple synchrone), on a tous les éléments pour faire, avec une grande précision, le calcul d'un essai.

3° La comparabilité, dans le temps, de cette machine avec elle-même, se vérifie aisément, et sans perte de temps appréciable. Il suffit, pour cela, de laisser osciller librement le pendule, et de constater qu'il présente toujours la même hauteur de remontée après un même nombre d'oscillations. Pratiquement, il suffit, avant chaque série d'observations, de contrôler que l'angle de remontée correspondant à la chute libre de la masse frappante à partir de l'angle de départ maximum, reste constamment le même.

4° L'enregistrement automatique de la hau-

(1) Georges Charpy et André Cornu-Thénard, *loc. cit.*, p. 102 et suiv.

teur de remontée par l'arrêt d'une aiguille, sur un cadran divisé, à la position d'élongation maxima, réduit au minimum les erreurs ou les ambiguïtés de lecture.

Nous n'insistons pas sur la description du Mouton-pendule Charpy, qui est bien connue (1) et nous nous bornons à en rappeler, par la photographie de la figure 1, la disposition générale.

Nous ne signalerons, en dehors des dispositions diverses (distance des appuis, arrondis, angle du couteau, etc...), qui seront précisées plus loin, que la particularité de construction suivante : pour éviter, au moment de l'impact, les réactions sur le bâti, de l'axe de suspension, nous nous sommes efforcé de faire ramener, par usinage, le centre d'oscillation du pendule dans le voisinage aussi immédiat que possible du milieu du nez du couteau : ce résultat peut être obtenu assez facilement par retouches successives de la masse.

Calcul d'une expérience. — Après avoir déterminé les caractéristiques de la machine et contrôlé le fonctionnement normal de l'aiguille indicatrice des remontées, nous avons établi le barème d'emploi de l'appareil de la façon suivante :

Soit P le poids de la masse frappante,

d la distance du centre de gravité à l'axe de suspension,

$\tilde{\gamma}$ l'angle de départ du mouton et $\tilde{\alpha}$ son angle de remontée après le choc,

Π_{γ} le travail dépensé pour vaincre les frottements et la résistance de l'air à la descente (correspondant à $\tilde{\gamma}$),

le travail dépensé pour vaincre les frottements et la résistance de l'air à la remontée (correspondant à $\tilde{\alpha}$),

Π_B le travail dépensé dans la projection des fragments du barreau après sa rupture,

T le travail de rupture du barreau,

on peut écrire en égalant l'énergie disponible avant le choc au travail absorbé par la rupture

du barreau augmenté de l'énergie restante après le choc :

$$Pd(1 - \cos \gamma) - \Pi_{\gamma} = Pd(1 - \cos \alpha) + \Pi_{\alpha} + \Pi_B + T \quad (1)$$

d'où l'on tire T , une fois déterminés les termes Π et les angles α et γ .

$\tilde{\alpha}$ et γ sont relevés sur le cadran de l'appareil, d'après la position de l'aiguille indicatrice.

Les valeurs des termes Π_{α} et Π_{γ} sont obtenues de la façon suivante : supposons qu'on laisse osciller librement le pendule à partir de sa position de départ, et qu'on note la valeur de tous les angles de remontée successifs $\tilde{\alpha}$, correspondant aux oscillations simples d'ordre impair. Soient $\widehat{A}$ et $\widehat{B}$ les angles relevés respectivement après la $(2n-1)^{\circ}$ et la $(2n+1)^{\circ}$ oscillation simple : la perte de hauteur subie par le centre de gravité entre ces 2 positions successives de la masse est : $d(\cos A - \cos B)$.

A la remontée seule (quart du trajet total considéré ci-dessus) et pour un angle $\frac{A+B}{2}$ la perte

de hauteur du centre de gravité sera de

$$\frac{d}{4}(\cos A - \cos B)$$

et la dépense de travail correspondante sera de

$$\Pi = P \frac{d}{4}(\cos A - \cos B). \quad (2)$$

Etant donné le caractère correctif des termes Π , nous nous contentons, pour obtenir les $(\cos A - \cos B)$ relatifs aux valeurs entières et consécutives des angles de remontée et intervenant dans la formule (2), de les relever sur une courbe

construite en portant, en abscisses, les $\frac{A+B}{2}$ dé-

terminés au cours de l'expérience préliminaire, et, en ordonnées, les $\cos A - \cos B$, correspondants.

Pour calculer le travail absorbé par la projection des fragments de barreau, on admet que ceux-ci, après rupture, sont animés d'une vitesse V égale à la vitesse restante au milieu du couteau. Cette hypothèse est parfaitement vérifiée dans le cas des métaux très résilients, qui ne cassent pas complètement au choc : pour ces métaux, en effet, les 2 fragments, encore reliés

(1) Georges Charpy, *Bulletin de la Société des Ingénieurs Civils*, Juin 1901.

ensemble en quelques points, se maintiennent à cheval sur le couteau, et sont ainsi entraînés par le pendule pendant la remontée. Pour les métaux usuels, l'expérience vérifie encore l'exactitude de l'hypothèse, les mesures n'étant pas troublées lorsqu'on prend la précaution de recueillir les fragments séparés dans de petits paniers fixés de part et d'autre du balancier. On peut donc écrire, dans ces conditions :

$$\Pi_B = \frac{1}{2} \frac{P}{g} V^2$$

en désignant par p le poids du barreau.

la distance du milieu du couteau à l'axe de suspension, on a :

$$\frac{V}{v} = \frac{R}{l} \quad \text{avec} \quad v = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)}$$

d'où l'on tire :

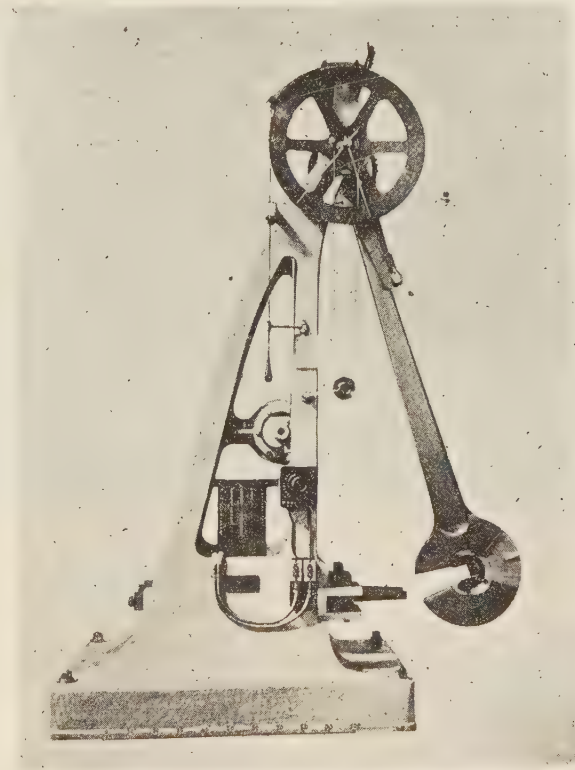
$$\Pi_B = p \frac{R^2}{l} (1 - \cos \alpha) \quad (3)$$

expression dans laquelle tous les facteurs peuvent être aisément déterminés.

En portant dans la formule (1) les différentes valeurs explicitées pour les termes II, on obtient le travail de rupture T , qui, exprimé en kilo-

Fig. 1.

Vue d'ensemble
du
Mouton-Pendule
Charpy
de 300 kgm.



(Voir page suivante
les
caractéristiques de cette
machine.)

Si l'on fait abstraction, dans le calcul de ce terme correctif, du travail absorbé par les frottements, qu'on désigne par l la longueur du pendule simple synchrone, par v la vitesse du point pesant au moment de son passage par la verticale avant sa remontée d'un angle α , et par R

grammètres et rapporté au centimètre carré, fournit la « résilience ».

Nous avons été amené, pour étudier le mécanisme des déformations successives subies par l'éprouvette au cours de l'essai, à faire des suites de déterminations sans pousser jusqu'à la rup-

ture. Pour cela, le barreau étant disposé sur ses appuis, on choisit une hauteur de chute inférieure à la hauteur minima susceptible de provoquer la rupture, et on laisse tomber le mouton sur l'éprouvette dans ces conditions. L'énergie mise en jeu au moment de l'impact, est définie, dans chaque cas particulier par l'angle de remontée à vide de la masse oscillante, angle dont la connaissance suffit pour exécuter tous les calculs nécessaires (vitesse d'impact, travail absorbé par le barreau non rompu, etc.).

Caractéristiques principales des machines employées. — Nous avons utilisé deux moutons-pendules de dimensions très différentes, correspondant aux 2 types de barreaux mis en œuvre, mais très sensiblement semblables, de façon à pouvoir exécuter avec ces machines, les essais relatifs à la loi de similitude.

Les caractéristiques principales de ces 2 appareils sont les suivantes :

	Moutons pendules utilisés pour l'étude des barreaux	
	de 10 × 10 × 53.3	de 30 × 30 × 160
Poids de la masse frappante P.	22,310 kg.	96,250 kg.
Distance du centre de gravité à l'axe de suspension d	0,691 m.	1 648 m.
Distance du milieu du couteau à l'axe de suspension R	0,750 m.	2,000 m.
Longueur du pendule synchrone l	0,769 m.	1,936 m.
Angle de départ maximum.	160°	160°
Angle de remontée à vide correspondant à l'angle de départ maximum	159° 2/10	157° 3/10
Vitesse d'impact correspondant à l'angle de départ maximum	5,27 m.	8 82 m.
Distance des appuis	40 mm.	120 mm.
Arrondis des appuis, du nez du couteau (diamètre).	2 mm.	4 mm.
Angle du couteau.	30°	45°

Exécution d'une suite de déterminations au choc. — Supposons que la série réservée aux essais de choc comporte n barreaux (quantité géné-

ralement comprise entre 10 et 15) ; on casse 3 ou 4 barreaux, à la plus grande hauteur de chute H du mouton, pour déterminer dans ces conditions le travail de rupture moyen de la série.

Ceci fait, on se fixe, d'après l'importance du lot de barreaux restants ($n - 3$ ou $n - 4$), un certain nombre d'angles de chute du pendule mettant en jeu, à l'impact, des énergies progressivement croissantes, depuis les plus basses jusqu'à celle qui provoquerait la rupture, d'après les résultats de la première détermination effectuée, et en supposant négligeable l'influence de la vitesse. Puis, on fait subir, à chacune des éprouvettes disponibles, un des chocs de la suite ainsi arrêtée : après l'expérience, on mesure l'angle pris par l'éprouvette, et on note l'état du fond de l'entaille ou toutes particularités se rapportant à la déformation subie. Les renseignements recueillis sont groupés sur une feuille d'essai, comportant les colonnes suivantes :

Désignation des barreaux	Angle de remontée du pendule		Angle du barreau	Travail absorbé	Observations (fond de l'entaille, etc.)
	à vide	après essai			

Si l'angle de départ réduit n'est pas suffisant pour provoquer la rupture, le mouton est arrêté par le barreau, et il n'y a pas de remontée pendulaire après essai : le travail absorbé par l'éprouvette n'est donc autre que l'énergie disponible au nez du couteau, dans les conditions de chute adoptées.

Si les barreaux cassent normalement pour une hauteur de chute notablement inférieure à la hauteur de chute minima déduite de la détermination initiale, on est en mesure, d'après la remontée pendulaire après essai, de calculer le travail absorbé dans ces conditions et de le comparer au travail définissant la résilience de la série (hauteur de chute H) : l'influence de la vitesse se met, dans ce cas, d'elle-même en évidence.

Si les barreaux ne cassent pas, normalement, pour la hauteur de chute minima déduite de la détermination initiale, on poursuit l'expérience jusqu'à obtenir, en toute sécurité, la valeur de l'angle de départ nécessaire pour provoquer la

barreaux de $30 \times 30 \times 160$ et de 5 t. pour les barreaux de $10 \times 10 \times 53,3$) un dispositif de réversion dont la photographie (fig. 2), ci-jointe donne une vue d'ensemble (cas des gros barreaux). Le dessin coté de la figure 3 précise les

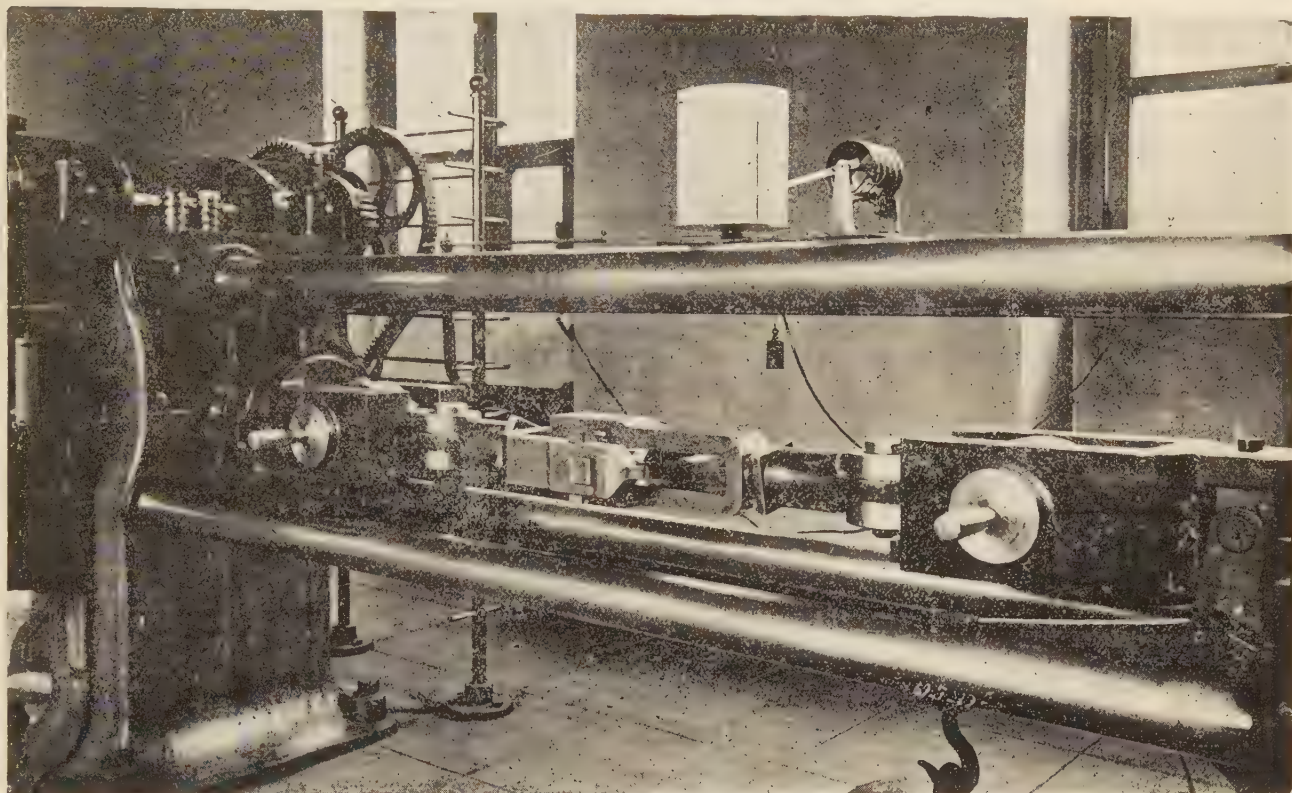


Fig 2. — Dispositif de réversion monté sur une machine à traction de 50 t. pour l'essai des barreaux entaillés de $30 \times 30 \times 160$ par action lente.

rupture : dans ce cas, également, l'influence de la vitesse ressort nettement des observations.

En tout état de cause, on est en possession des renseignements suffisants pour construire la courbe représentant les déformations successives des éprouvettes en fonction des travaux croissants absorbés par ces dernières.

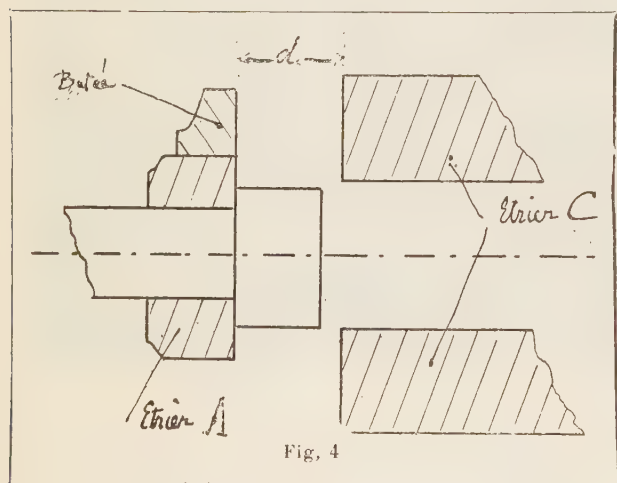
B) DISPOSITIFS POUR LES ESSAIS PAR ACTION LENTE. — *Description des appareils.* — Pour exécuter les essais par action lente, on installe sur une machine à traction Falcot (de 50 t. pour les

différents organes de l'appareil réservé à l'essai des petits barreaux (pour les gros barreaux, les dimensions sont multipliées par 3), dont le schéma peut être succinctement présenté comme suit :

Deux étriers A et C, dont les plans sont à angle droit, sont reliés par des tirants G aux mords de la machine : l'étrier C porte un couteau, et l'étrier A deux appuis identiques à ceux du mouton-pendule correspondant. Le barreau étant centré sur ces appuis, on amène le nez du couteau en contact avec la face de l'éprouvette

opposée à l'entaille : puis, on règle l'ensemble par le jeu des étriers l'un par rapport à l'autre, de façon à ce que l'effort transmis par le couteau se produise, durant tout le cours de l'essai, rigoureusement dans le plan vertical passant par l'axe du cylindre de l'entaille. L'acier constituant les diverses pièces de l'appareil de réversion et les dimensions de celles-ci, ont été choisies de façon à ce qu'après un traitement convenable, le dispositif ne travaille jamais à plus de 10 % de la limite élastique du métal.

Caractéristiques principales des appareils de réversion. — Les distances des appuis, les arrondis des appuis et du nez du couteau, et l'angle du couteau sont identiques à ceux du moutonpendule destiné à casser les barreaux de mêmes dimensions.



Mode opératoire adopté pour les déterminations. — Les déterminations par action lente sont effectuées de la façon suivante :

On fait un premier essai en actionnant la machine au moteur, de façon à localiser grossièrement, dans l'échelle des charges, les points intéressants qu'il ne faut pas laisser échapper dans l'épreuve définitive.

On place ensuite un deuxième barreau, définitif celui-là, sur l'appareil : puis, on monte progressivement la charge jusqu'à 500 kg. (pour les

gros barreaux : 50 kg. pour les petits), de façon à tendre le système, et à éliminer les jeux de la machine. A ce moment, on mesure à la jauge à expansion la distance d_0 qui sépare deux plans bien dressés, exécutés, l'un sur la tranche de l'extrémité de la branche supérieure de l'étrier C, l'autre sur une butée fixée à la partie supérieure du fond de l'étrier A (voir fig. 4 ci-contre). Pour tous les aciers étudiés, la charge $C_0 = 500$ kg. (pour les gros barreaux : 50 kg. pour les petits) produit une flèche insignifiante de l'éprouvette, et l'on peut, dans ces conditions, considérer les accroissements ultérieurs $d_1 - d_0$, $d_2 - d_0$, etc... de la distance d , comme les valeurs des flèches prises par les barreaux sous les charges successives imposées $C_1, C_2...$

La distance d_0 étant relevée, on monte progressivement les charges de 500 en 500 kg. ou de 1.000 en 1.000 kg., en tenant compte des résultats de l'essai préliminaire ; on note, pour chaque C_n , les d_n correspondantes et on examine, à l'aide d'un dispositif optique facile à imaginer (lampe, miroir et lunette astronomique) le fond de l'entaille, de façon à en saisir les modifications au fur et à mesure de leur production.

Après l'imposition de chacune des charges C_n , et avant de passer à la suivante, on revient en arrière jusque vers 450 kg. pour remonter à $C_0 = 500$ kg. exactement (pour les gros barreaux : 50 kg. pour les petits) : c'est dans ces conditions qu'on relève l'angle de l'éprouvette, sans démontage, en suivant, sur une feuille de carton le profil de cette éprouvette à l'aide d'un crayon bien taillé : à égalité de travail absorbé, la détermination ainsi obtenue peut être comparée à celle que fournit l'essai au choc. On note, d'autre part, la flèche $d_n - d_0$ dont la considération permet, d'une part, de préciser le moment à partir duquel le barreau conserve une déformation permanente (limite élastique) et, d'autre part, de contrôler la mesure des angles.

On décrit ainsi un certain nombre de cycles, tous situés au-dessus de l'horizontale C_0 , dont l'allure générale est commodément suivie sur l'enregistreur de la machine à traction. Un pareil

[illegible]

Fig. 3.
Dispositif pour l'essai par action lente des barreaux
de flexion entaillés.

diagramme, relatif au barreau de $30 \times 30 \times 160$, n° 31 C2, est donné par le graphique de la figure 5 : ce graphique fait clairement comprendre la façon dont l'opération est conduite et il n'est pas nécessaire d'insister plus longuement sur ce point.

On poursuit l'expérience jusqu'à ce que

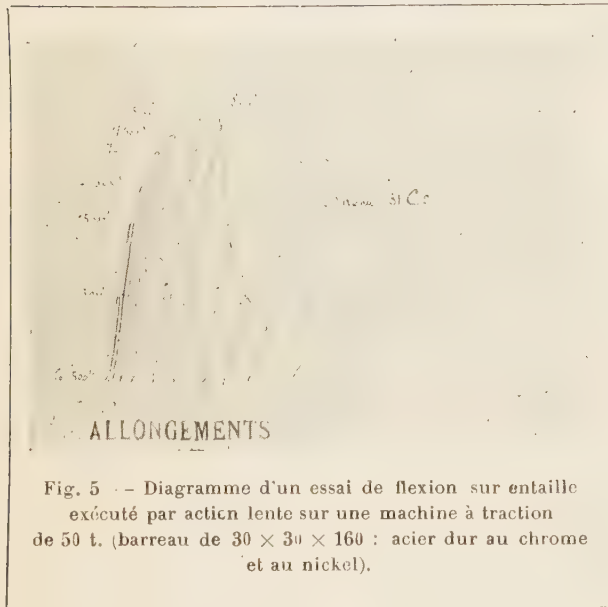


Fig. 5 -- Diagramme d'un essai de flexion sur entaille exécuté par action lente sur une machine à traction de 50 t. (barreau de $30 \times 30 \times 160$: acier dur au chrome et au nickel).

l'éprouvette se rompe ou qu'elle soit sur le point de franchir ses appuis, ou encore jusqu'à ce que la charge soit retombée aux environs de 100 kg. (pour les gros barreaux : 10 kg. pour les petits) : ce dernier cas est celui du barreau 31 C2.

Les résultats recueillis au cours de l'essai et les renseignements qu'on en déduit sont groupés dans un tableau sous les rubriques suivantes :

Charges	Angles du barreau	Flèches mesurées sur l'appareil		Flèches relevées sur l'enregistreur		Planimétrage de la courbe construite		Observations du fond de l'entaille
		sous charge	sous 500 kg.	sous charge	sous 500 kg.	aires	travaux	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	

En portant en ordonnées les charges de la colonne (1) et en abscisses les flèches inscrites sur la même ligne horizontale dans la colonne (3), on trace une courbe dont le planimétrage (aires, colonne 7) fournit les travaux absorbés (colonne 8) par le barreau, à chaque instant au cours de l'épreuve.

Les chiffres des colonnes (5) et (6), qui sont relevés directement sur le diagramme de l'enregistreur, vérifient ceux des colonnes (3) et (4) : ils font éventuellement ressortir une erreur de lecture grossière à la jauge à expansion et mettent en évidence un décalage possible des appareils : ils interviennent exceptionnellement dans les calculs, dans le cas d'une rupture brusque par exemple, lorsque la mesure à la jauge n'a pas pu être exécutée.

D'autre part, les déformations subies par le fond de l'entaille (colonne 9) sont localisées, avec autant de précision qu'il est possible, dans l'échelle des travaux absorbés.

Enfin, si l'on porte en ordonnées les angles du barreau (colonne 2) et en abscisses les travaux absorbés (colonne 8) inscrits sur la même ligne horizontale, on obtient une courbe exprimant la succession des déformations subies par les éprouvettes, correspondant à la courbe qui a été obtenue, d'une façon analogue, dans le cas des sollicitations vives.

C) SÉRIES DE BARREAUX ENTAILLÉS. — *Choix des barreaux.* — Notre programme de recherches comportait l'étude de la loi de similitude : nous avons donc été naturellement amené à mettre en œuvre deux barreaux semblables, et à choisir les dimensions préconisées par le Congrès de Copenhague,

barreau de $30 \times 30 \times 160$ et barreau $10 \times 10 \times 53,3$

qui sont admises par la grande majorité des expérimentateurs.

Restait la question de l'entaillage.

Nous avons signalé plus haut que le nombre considérable d'entailles actuellement en usage dans les divers laboratoires, pouvait se classer

en 3 catégories principales : rondes, aigües et traits de scie. Comment nous avons fixé notre choix sur une de ces catégories et sur un type particulier de cette catégorie, c'est ce que nous nous proposons d'indiquer maintenant.

Il était évidemment indispensable, dans une suite de recherches qui pouvaient nécessiter une grande précision, de ne pas introduire d'erreurs accidentelles dues à la non-identité de l'entaillage d'un barreau à l'autre. De ce point de vue, l'entaillage cylindrique, pratiqué au foret, nous a paru donner le maximum de garanties. Examinons, en effet, les autres modes d'entaillage considérés ci-dessus.

Les entailles aigües sont, en général, ébauchées, soit à l'outil d'étau linceur ou de raboteuse, soit à la fraise, puis terminées, soit par exécution d'une passe à l'aide d'un de ces outils réservé pour la finition, soit par impression d'un coin rigoureusement profilé. Or, d'une part, les outils de forme sont difficiles à réaliser toujours identiques à eux-mêmes (arrondi terminal extrêmement petit) : ils risquent, en outre de s'émousser dans la suite des opérations, et, comme ils travaillent parallèlement à l'entaille, les aspérités ou les points durs accidentels qu'ils peuvent présenter, sont susceptibles de donner naissance à des stries très fines, fonctionnant comme entailles secondaires très aigües. D'autre part, avec le coin, on ne peut répondre d'une déformation fortuite du tranchant : de plus, on écrouit, avant l'essai, la partie du métal qui intervient le plus directement dans l'épreuve (fond de l'entaille) et dont il y aurait le plus grand intérêt à ne pas troubler la structure.

Quant aux traits de scie, il paraît également malaisé de les définir avec précision : que la lame, en effet, soit plus ou moins usagée, et les angles du fond du trait sont plus ou moins vifs : en outre, le fait que la scie travaille parallèlement à l'entaille, prête à des observations analogues à celles qui ont été formulées dans le cas des outils de rabot et des fraises.

Il semble que l'entaille ronde, pratiquée au foret, échappe à ces différents ordres de crité-

ques : le foret, en effet, peut être vérifié constamment, avec la plus grande précision, à l'aide du pied à coulisse : il travaille, en outre, perpendiculairement à l'entaille, et ne risque pas, ainsi, de produire ces amorces de fissures, dont nous avons souligné, ci-dessus, le danger.

C'est donc à l'entaille ronde que nous avons donné la préférence : mais il fallait encore en définir la profondeur et le diamètre.

Des expériences préliminaires, confirmées par des déterminations plus précises dont nous rendons compte à la fin de ce travail (voir page 62) nous ont montré qu'il était indispensable d'entailler profondément les barreaux, et de ne pas fixer arbitrairement, sur de simples considérations de commodité, le diamètre de l'entaille. Nous nous sommes donc décidé à adopter les types de Copenhague, qui réalisent les deux conditions reconnues nécessaires, et nous avons exécuté toutes nos recherches en nous servant des éprouvettes suivantes :

barreau de $30 \times 30 \times 160$, entaillé au foret de 4 mm. de diamètre, à mi-épaisseur,

et barreau de $10 \times 10 \times 53,3$, entaillé au foret de 1,3 mm. de diamètre, à mi-épaisseur.

Constitution des séries de barreaux d'égale résilience. — Nous avons montré, dans un mémoire antérieur (1), qu'il était possible de constituer des lots de barreaux dont les résiliences individuelles ne différeraient pas de plus de 5 à 10 % du résultat moyen de la série, prouvant par là-même que les essais de choc sur entaille étaient susceptibles de présenter la même régularité que les autres épreuves usuelles, traction, dureté, etc... Le mode opératoire suivi, pour préparer le matériel destiné à ces nouvelles recherches, est exactement celui qui est exposé, en détails, dans le travail précité. Nous ne reviendrons donc pas sur cette question et nous nous bornerons à donner les précisions d'ordre général suivantes :

Sauf exception bien spécifiée en temps oppor-

(1) Georges Charpy et André Cornu-Thénard, *loc. cit.*, p. 89 et suivantes.

ESSAIS AU CHOC SUR ENTAILLES

tun, nous constituons des séries de 10 à 15 gros barreaux, provenant d'une même barre, sur lesquels nous exécutons une première suite de déterminations. Ces gros barreaux sont désignés 1° par une lettre ou un nombre, ou l'ensemble des deux, représentant le métal employé et 2° par le numéro d'ordre du barreau dans la barre. Ainsi le barreau 31 B7, est prélevé le septième dans la barre B de l'acier 31.

Les barrettes de 10×10 sont prélevées sauf exception spécifiée, dans les 2 fragments de gros barreaux antérieurement rompus, à raison de 4 barrettes par fragment. Ces barrettes portent la marque du barreau dont elles proviennent, la lettre étant affectée de l'indice *p*, et le numéro d'ordre étant suivi du chiffre représentant la position de la barrette dans le fragment qui lui a donné naissance. Ainsi le barreau 31 B7 produit les barrettes 31 B_p 71, 31 B_p 72, jusqu'à 31 B_p 78.

D) DÉFINITIONS CHIMIQUE ET MÉCANIQUE DES MÉTAUX MIS EN OEUVRE. — Nos recherches ont porté sur un certain nombre d'aciers, aussi différents que possible au point de vue mécanique, les uns susceptibles de présenter l'état fragile ou l'état non fragile suivant le traitement subi, les autres fragiles du fait de leur composition chimique. Nous avons adjoint à ces aciers un échantillon de cuivre rouge légèrement oxydé (1,25 % d'oxydure), obtenu en refondant, au creuset, sans protection spéciale contre l'oxydation, du métal pur du commerce. Nous n'avons pas fait intervenir de cuivre pur ordinaire, car nous savions par nos études antérieures, qu'il se comportait sensiblement, au point de vue du choc, comme un acier de résilience moyenne.

Le tableau ci-contre précise les marques distinctives de chacun des aciers employés et leur composition chimique.

Ces métaux donnent, à la traction, après les traitements thermiques indiqués dans la seconde colonne, les résultats moyens suivants : (les éprouvettes de 13,8 mm. de diamètre, repérées à 50 mm., sont prélevées dans les 2 fragments

Compositions chimiques des métaux mis en œuvre.

Désignation des métaux	C	Si	Mn	Ph	S	Cr	Ni
Acier 55 . . .	0,15	0,09	0,44	0,009	0,022	»	»
— EII ou og M	0,30	0,25	0,20	0,022	0,010	»	»
— JIV . . .	0,46	0,37	0,64	0,021	0,009	»	0,96
— 31 . . .	0,00	0,28	0,52	0,021	0,022	1,49	2,76
— 357 . . .	0,14	3,00	0,32	0,010	0,056	»	»
— K . . .	0,78	0,40	0,77	0,014	0,010	1,57	23,50

TABLEAU I

d'un des barreaux entaillés de chaque série, après l'essai de choc).

Caractéristiques mécaniques des métaux mis en œuvre.

Désignation des métaux	Traitements thermiques	Limite élastique	Limite de rupture	Allongement	Striction
		kg/mmq	kg/mmq	%	%
Acier 55 { état B. état E. ou H	trempe à l'eau	13,1	45,5	39	70,3
	recuit prolongé	17,4	37,9	38	63,9
Acier EII . . .	trempe et revenu	46,4	67,9	28	67,6
	(états divers (og M))	Caractéristiques mécaniques précises au cours du travail			
Acier JIV . . .	trempe et revenu	51,9	74,7	26	63,4
Acier 31 { état B. ou C. état E.	trempe et revenu	88,5	105,3	20	50,6
	recuit	51,5	87,9	20	51,2
Acier 357 . . .	recuit	49,8	64,5	28	55,1
Acier K . . .	trempe à l'eau	34,7	76,2	59	63,9
Cuivre oxydé . .	recuit	7,8	22,1	47	49,1

TABLEAU II

Ce tableau fait ressortir la variété du matériel utilisé :

Tout d'abord, l'acier extra-doux, sous deux états, que l'épreuve de traction distingue déjà, mais qui, comme la suite le montrera, jouissent de propriétés totalement différentes au point de vue de l'essai au choc sur entaille.

Puis, d'une part, les métaux E II et J IV et, d'autre part, l'alliage 357 : ces deux groupes, assez voisins l'un de l'autre à la traction, ne présentent aucune analogie à la résilience.

L'acier 31, dur au chrome et au nickel, que nous utilisons à l'état traité pour emploi usuel, et à l'état recuit.

L'acier K, à 23 % de nickel, remarquable par la différence considérable entre les valeurs de sa limite élastique et de sa limite de rupture et par son allongement exceptionnel, qui (59 %) est presque deux fois supérieur à celui des aciers courants.

Enfin le cuivre rouge, légèrement oxydé : il n'intervient que de façon secondaire et à titre documentaire : comme la suite le montrera, ses propriétés sont très voisines de celles du cuivre

pur ordinaire et ne présentent pas d'intérêt spécial.

Le matériel mis en œuvre étant ainsi défini, le programme des recherches et le principe des méthodes adoptées ayant été indiqué antérieurement, nous pouvons passer à la description des résultats obtenus, qui fait l'objet de la deuxième partie de notre travail. Avant de procéder à cet exposé, nous sommes heureux d'adresser l'expression de notre profonde gratitude à M. Georges Charpy, qui, au cours de nos travaux, a bien voulu nous faire profiter de son expérience et nous prodiguer si largement ses conseils.



DEUXIÈME PARTIE

(Exposé des recherches effectuées)

CHAPITRE I. — Cas général : Métaux traités pour emplois usuels.

CHAPITRE II. — Cas particulier : Métaux recuits.

CHAPITRE III. — Cas exceptionnel : Acier extra-doux cristallisé à gros grains.

CHAPITRE I^{er}

CAS GÉNÉRAL : MÉTAUX TRAITÉS POUR EMPLOIS USUELS

Nous étudierons ici, les aciers n^{os} 55 (état B), E II, J IV, 31 (état B ou C), K et le cuivre oxydé.

A) Influence de la vitesse sur les résultats de l'essai. — 1^o BARREAUX DE 30 × 30 × 160. — a) *Action lente.* — Les diagrammes des essais par action lente, pour chacun des métaux ci-dessus, sont donnés par les figures 6, 7, 8, 9, 10 et 11. Ils ont tous été obtenus comme nous l'avons exposé dans le chapitre III de la première partie (voir page 13); nous nous bornons donc à transcrire ici le tableau complet (voir tableau III, page suivante) d'une des déterminations pour l'acier J IV, qui présente des propriétés moyennes par rapport aux autres métaux de cette catégorie.

Si l'on suit, avec attention, l'essai dont les diagrammes ci-dessus présentent l'ensemble, on peut faire les constatations suivantes :

L'apparition, au fond de l'entaille, d'une crique très fine et très courte (voir colonne 9 du tableau III) correspond toujours à l'imposition de la charge maxima (tangente horizontale du diagramme) supportée par le barreau.

Une fois amorcée, cette crique s'allonge, en même temps que la valeur de la charge diminue et que la flèche du barreau s'accroît : elle s'allonge jusqu'à ce qu'elle occupe toute la hauteur du fond de l'entaille.

Le moment où la crique débouche sur les côtés de l'éprouvette est critique : il fait ressortir, pour les divers métaux, tous bien résiliants, que nous examinons ici, deux façons différentes de se comporter, qui se traduisent par deux allures distinctes des courbes représentatives de l'épreuve.

D'une part, les métaux qui subissent l'instant critique sans lâcher : ce sont l'acier extra-doux (barreau 55 B₂), l'acier dur au chrome et au nickel (barreau 31 C₂), l'acier à 23 % de nickel (barreau KA₃) et le cuivre (barreau Cu₁₁) : les courbes correspondantes ne présentent aucune discontinuité.

D'autre part, les métaux pour lesquels la propagation de la crique sur les côtés du barreau marque un amoindrissement considérable de leur résistance et qui cèdent brusquement : ce sont les aciers demi-dur (barreau E II 5) et demi-dur au nickel (barreau J IV 2), pour lesquels la charge tombe brutalement de 5.250 kg. à 500 kg. (E II) et de 5.500 kg. à 2.000 kg. (J IV) : la discontinuité marquée par les diagrammes correspondants illustre les faits observés.

Anticipant un peu sur l'exposé de nos résultats, nous faisons remarquer immédiatement que les aciers E II et J IV forment la transition entre

Charges	Angles du barreau en degrés	Flèches mesurées sur l'appareil		Flèches relevées sur l'enregistreur		Planimétrage du diagramme construit		Observations du fond de l'entaille
		sous charge en mm.	sous 500 kg en mm.	sous charge en mm.	sous 500 kg. en mm.	en mmq.	en kgm.	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
200 kg.	«	39,8	«	«	«	«	«	«
500	«	39,9	39,9	«	«	«	«	«
1.000	«	40,0	«	«	«	«	«	«
2.000	«	40,2	39,9	«	«	«	«	«
3.000	«	40,5	39,9	9,3	«	«	«	«
3.500	«	40,6	39,9	10,2	7,0	«	«	«
4.000	«	40,9	40,0	11,2	7,7	«	«	«
4.250	«	41,0	40,1	12,2	8,5	«	«	«
4.500	1°	41,2	40,5	14,2	10,4	780	3,90	«
5.000	3°	42,2	41,4	19,7	15,3	1.710	8,55	le fond se dépolit
5.500	5°	43,5	42,7	27,6	22,5	3.090	15,45	«
6.000	9°	45,5	44,5	38,6	33,0	5.400	27,00	fortes gerçures au fond
6.250	12 30	47,5	46,5	51,0	44,6	7.890	39,45	amorce de crique sur un tiers de la hauteur
5.800	«	deduit de l'enregistreur	«	59,0	«	«	«	«
A 5.800 kilogs la pression tombe brusquement jusqu'à 2.100 kilogs								
2.100	18°30	50,0	49,5	63,5	61,5	10.540	52,70	la crique a débouché brusquement sur les côtés du barreau
1.000	27°	54,2	53,9	86,7	85,7	11.770	58,85	la fissure s'étend sur la moitié de l'épaisseur du barreau
500	38°	59,0	59,0	118,0	118,0	12.460	62,30	
100	«	deduit de l'enregistreur	«	230,0	«	13.410	67,05	le barreau est presque entièrement rompu

TABLEAU III

les métaux résilients du premier groupe distingué ci-dessus, qui ne cèdent pas à l'instant critique, et les métaux à résilience inférieure (aciers recuits, ou trempés et revenus à basse température, ou etc...), dont la rupture brusque et complète est provoquée par le débouchage de la crique sur les côtés du barreau : dans ce dernier cas, la charge tombe à zéro et le diagramme est interrompu brutalement.

Les courbes représentatives de l'essai présentent, pour les métaux étudiés, deux points communs : elles partent toutes de l'origine suivant une ligne droite ; puis, après un fléchissement

plus ou moins prononcé et prolongé, elles atteignent leur tangente horizontale. Nous pouvons donc considérer que l'épreuve se décompose naturellement en 3 périodes distinctes : la période initiale ou élastique, correspondant à la portion rectiligne au cours de laquelle le barreau perd intégralement, après suppression de la charge, la flèche qu'il avait prise ; la période intermédiaire qui s'étend jusqu'à la tangente horizontale, et la période finale qui aboutit à la rupture.

La considération de cette dernière phase de l'essai, que l'observation attentive du phénomène a nettement mise en évidence, nous amène à rappeler la notion de « fissilité » que M. Brust-

Barreau n° 55 B 2

Echelle des charges : 40 m.m. pour 500 Kgr
Echelle des allongements : 40 m.m. pour 1 m.m.

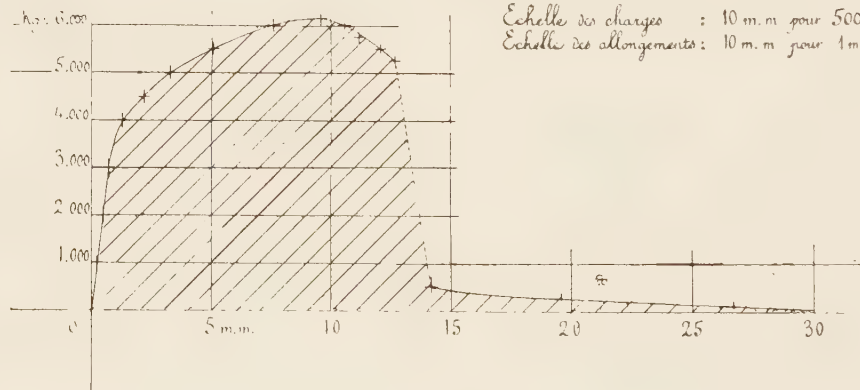
Fig. 6.



Barreau n° E II 5

Echelle des charges : 10 m.m. pour 500 Kgr
Echelle des allongements : 10 m.m. pour 1 m.m.

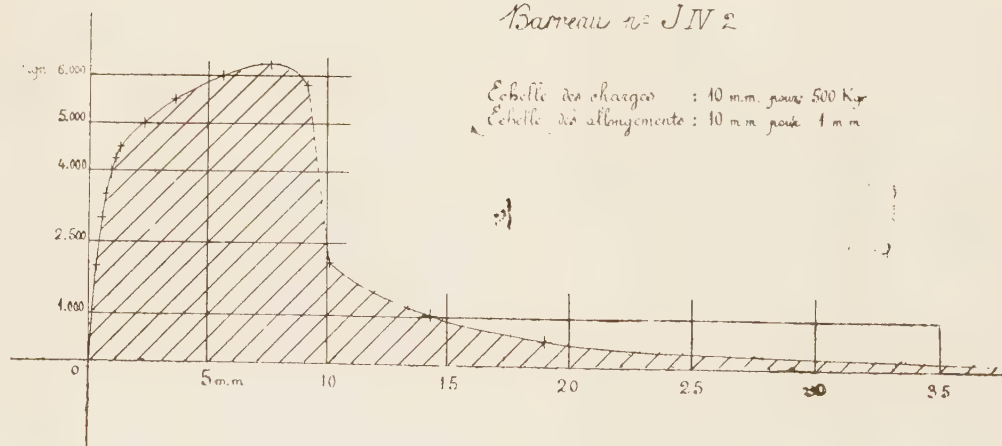
Fig. 7.



Barreau n° J IV 2

Echelle des charges : 40 m.m. pour 500 Kgr
Echelle des allongements : 40 m.m. pour 1 m.m.

Fig. 8.



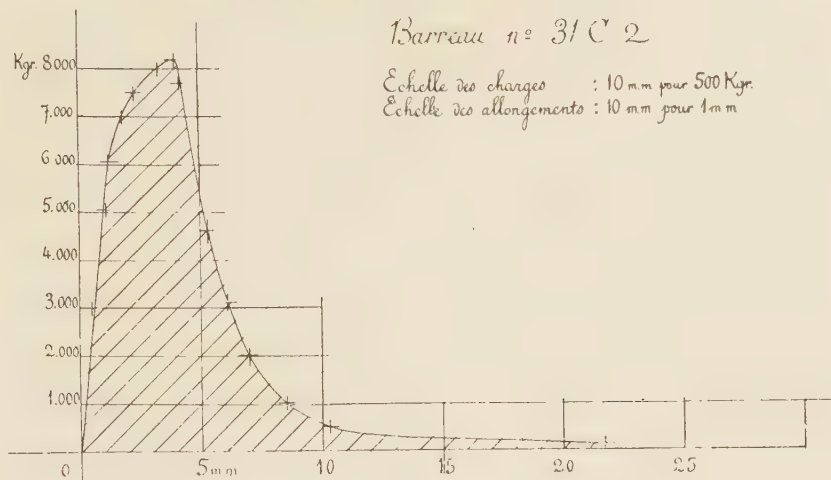


Fig. 9.

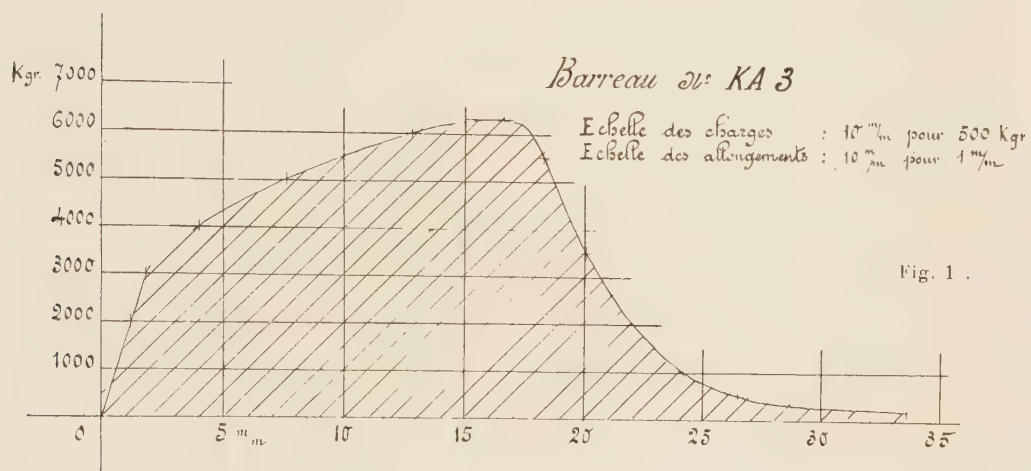


Fig. 10.

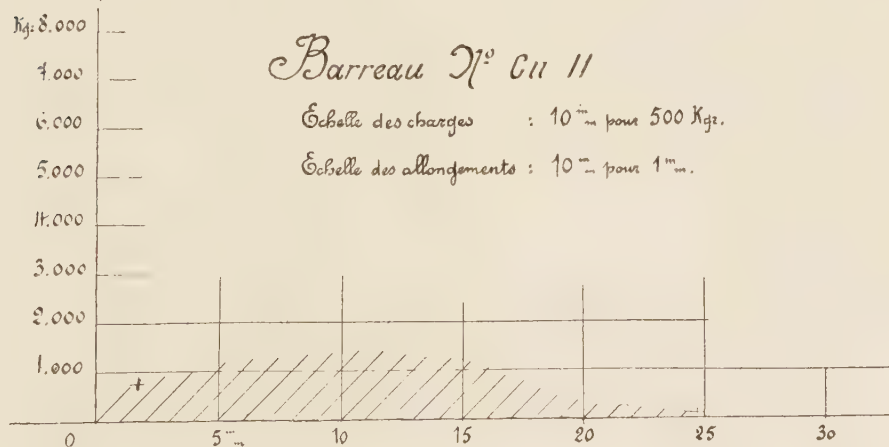


Fig. 11.

lein (1) paraît avoir invoquée le premier et qu'il définissait « la facilité avec laquelle se propage toute fente, amorcée d'une manière quelconque ». C'est bien à une mesure de la fissilité que notre procédé d'investigation nous conduit et il semble intéressant, dans le cas où les mécanismes de sollicitations vive et lente seraient analogues, d'introduire la part qui revient à cette qualité de la matière, dans le travail total de rupture d'un barreau.

Voici le tableau qui donne l'expression numérique des différentes périodes du phénomène :

Désignation des métaux (1)	Changement de direction		Tangente horizontale		Travail de rup- ture T_l (6)	Rapport $\frac{T_l}{T_i} \times 100$ (7)
	Charge	Travail	Charge	Travail T_i		
	kg.	kgm	kg.	kgm.	kgm.	%
Acier 55 B.	2.000	0,3	4.225	61,90	142,31	43
Acier E II	3.500	1,7	6.150	47,20	73,80	64
Acier J IV.	4.250	3,1	6.250	38,80	67,05	58
Acier 31	6.000	3,4	8.200	23,70	44,35	53
Acier K	3.000	2,6	6.300	76,70	109,70	69
Cuivre.	500	»	1.425	11,30	22,10	51

TABLEAU IV

Si l'on classe les métaux considérés ici dans l'ordre de leurs limites élastiques et de leurs limites de rupture croissantes (d'après le tableau II de la page 18), on constate que ce classement coïncide avec celui qu'on obtient en considérant les charges croissantes correspondant respectivement au changement de direction et à la tangente horizontale. Il en est de même en ce qui concerne les travaux absorbés à ces deux époques, sauf pour le métal K : l'anomalie manifestée par cet alliage est due aux allongements considérables qu'il est susceptible de prendre. Mais

si l'on n'envisage que les charges, l'acier à 23 % de nickel suit la loi commune.

Il semble qu'on puisse dire, dans ces conditions, que l'essai de flexion sur entaille, *par action lente*, et dans le cas du matériel examiné, met en jeu, tout au moins dans les deux phases initiale et intermédiaire distinguées plus haut, les mêmes caractéristiques mécaniques que l'épreuve à la traction ordinaire.

Examinons, maintenant, la 3^e période, celle dans laquelle intervient la fissilité : on peut se faire une idée de la valeur relative du travail absorbé au cours de cette période, en prenant le complément à 100 des nombres inscrits dans la colonne 7 du tableau IV ci-dessus ; comme nous l'avions, au moins qualitativement, fait pressentir plus haut, le nouveau point de vue auquel nous nous plaçons rapproche les uns des autres le cuivre, l'acier extra-doux (57 %) et même le chrome-nickel-dur (47 %) et les distingue du demi-dur au nickel (42 %), du demi-dur (36 %) et de l'alliage à 23 % de nickel (31 %). Ce dernier est cependant loin d'être fissile : mais les deux premières portions du phénomène y sont si développées que la troisième paraît relativement beaucoup moins importante qu'elle ne l'est en réalité. Il convient donc d'examiner, en même temps que le rapport $\frac{T_l - T_i}{T_l} \times 100$, la valeur in-

trinsèque de la différence $T_l - T_i$: de ce point de vue, l'acier K se rapproche du métal extra-doux, le plus résilient de la série. Nous nous proposons, d'ailleurs, de revenir, au cours de l'étude des métaux recuits, sur cette considération de la fissilité, en ce qu'elle peut éclairer la notion de fragilité.

Les diagrammes des figures 12 à 16 donnent les courbes de déformations des barreaux (colonne 2 du tableau III), en fonction des travaux absorbés (colonne 8 du même tableau) relatives aux aciers 55 B, E II, J IV, 31 B et K, à la fois pour les essais par action lente et par choc. Nous les examinerons comparativement lorsque nous nous occuperons des épreuves au choc.

(1) Brustlein : Note sur les fers et les aciers (10 Juillet 1892).
Commission française des méthodes d'essais.

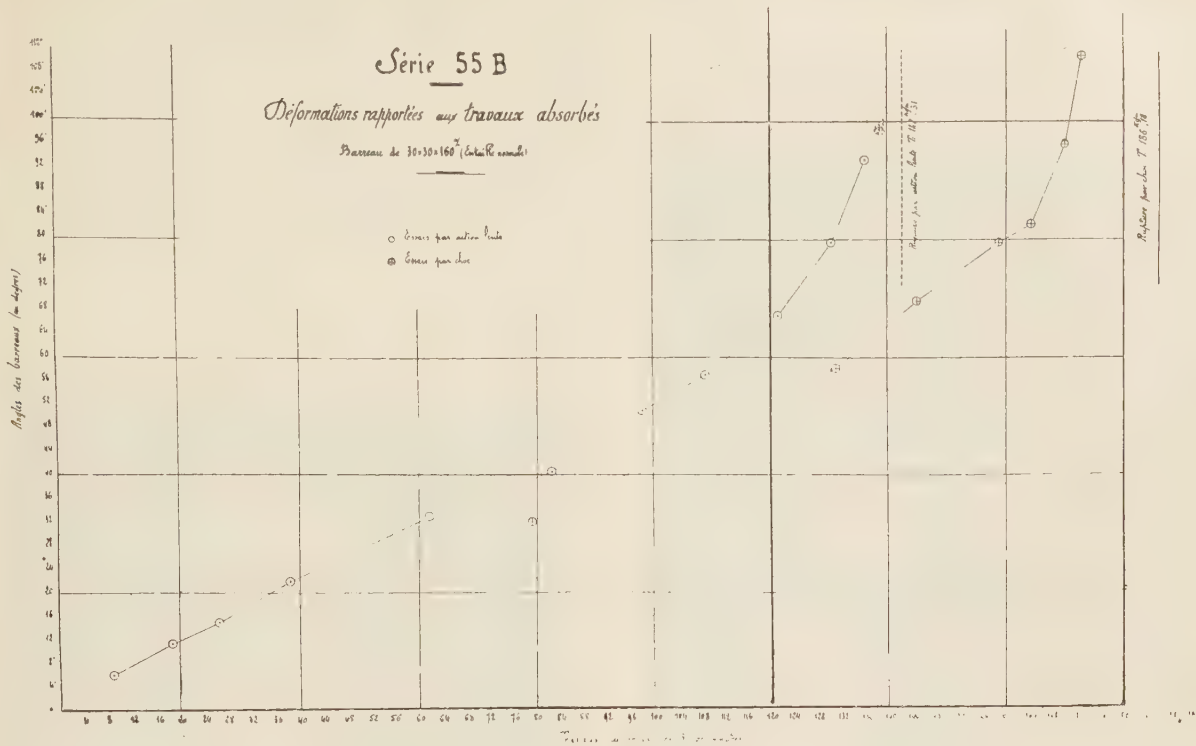


Fig. 12.

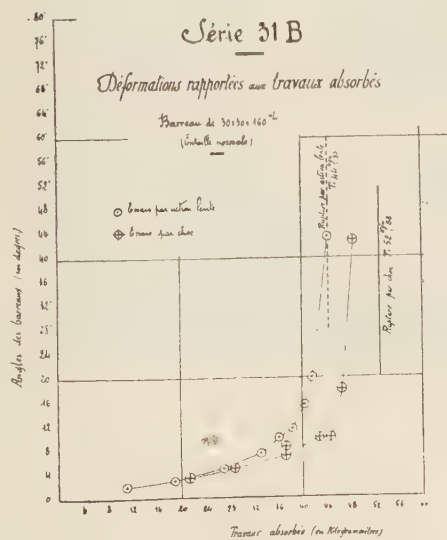
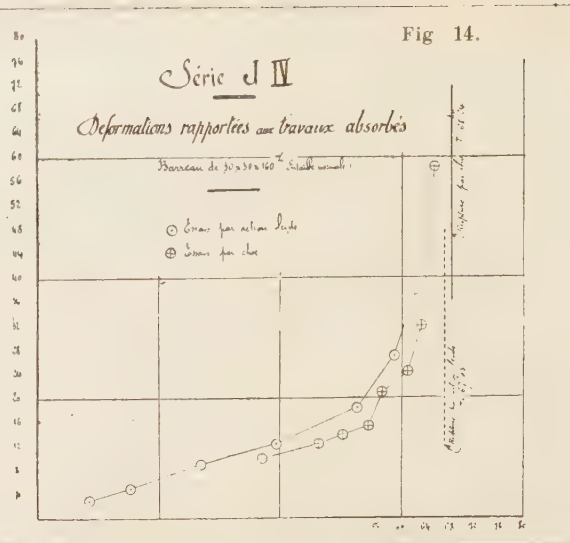
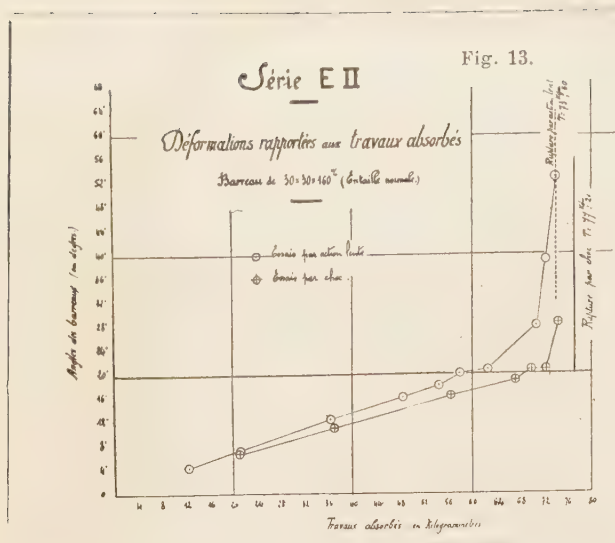


Fig. 15.



Fig. 16.



Série de déterminations au choc sur acier J IV,
(Barreaux de 30 x 30 x 160.)

Désignation des barreaux	Remontée pendulaire		Angle du barreau en degrés	Travail absorbé en kgm.	Observations du fond de l'entaille
	à vide en degrés	après essai en degrés			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
J IV 1.	157° 7/10	118°	»	70,06	
— 2.	Essai par action lente				
— 3.					
— 4.	Conservé pour éventualités				
— 5.	49°	arrêt	15°30'	54,63	crisure sur 5/6 de la hauteur de l'entaille.
— 6.	157° 7/10	116°	»	75,08	
— 7.	47°	arrêt	14°	50,50	crisure sur 3/4 de la hauteur de l'entaille.
— 8.	45°	arrêt	12°30'	46,51	crisure sur 2/3 de la hauteur de l'entaille.
— 9.	40°	arrêt	10°	37,15	Le fond de l'entaille est gercé, mais non criqué
— 10.	50°	arrêt	21°	56,74	La fissure débouche de 6 mm. sur les côtés.
— 11.	157° 7/10	120°	»	65,13	
— 12.	52°	arrêt	24°30'	61,05	La fissure débouche de 8 mm. sur les côtés.
— 13.	54°	arrêt	58°30'	65,48	Barreau presque rompu.
— 14.	54°	arrêt	Le barreau se casse en tombant sur le sol.		
— 15.	53°	arrêt	32°	63,25	La fissure débouche de 10 mm. sur les côtés.
— 16.	157° 7/10	121°	»	62,70	

Travail de rupture moyen de la série $T_c = 68,24 \pm 4,32$

TABLEAU V

b) Choc. — Nous donnons ci-contre, à titre d'exemple, le tableau complet d'une détermination par choc, pour le métal J IV.

Le diagramme de la figure 14 rassemble, pour le métal J IV, les résultats de ce tableau, ainsi que, pour faciliter la comparaison, les résultats correspondants de l'essai par action lente (tableau III, page 21). D'autre part, les photographies des figures 17, 18 et suivantes montrent, pour l'extra-doux, les deux demi-durs et le chromenickel dur, les aspects successifs présentés par les barreaux (profil et fond de l'entaille) à la suite des déformations qui leur sont imposées par choc.

Désignation des métaux	Travail de rupture		
	Action lente T_l	Choc T_c	$\frac{T_l}{T_c} \times 100$
	(2)	(3)	(4)
(1)	Kgm.	Kgm.	
Acier 55 B.	142,31	186,18	76 %
— E. II	73,80	77,21	95
— J. IV.	67,05	68,24	98
— 31	44,35	52,88	83
— K.	109,70	112,27	97
Cuivre	22,10	27,67	79

TABLEAU VI

Un premier examen de ces diagrammes, pour l'ensemble des métaux étudiés (figures 12, 13, 14, 15 et 16), conduit aux observations suivan-

ACIER EXTRA DOUX, N° 55, état B

(Traité pour emplois usuels).

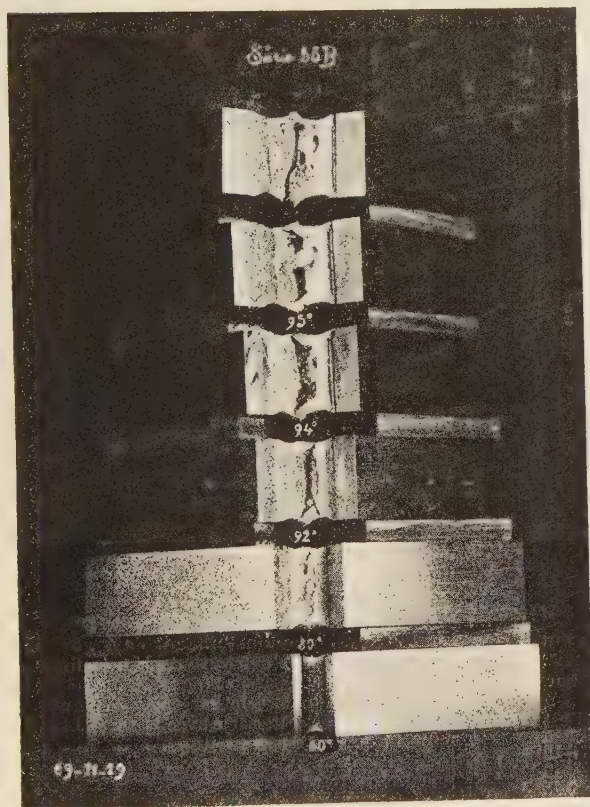


Fig. 17.

On voit l'aspect présenté par le fond de l'entaille de chacun des barreaux dont le profil est donné dans la fig. 18.

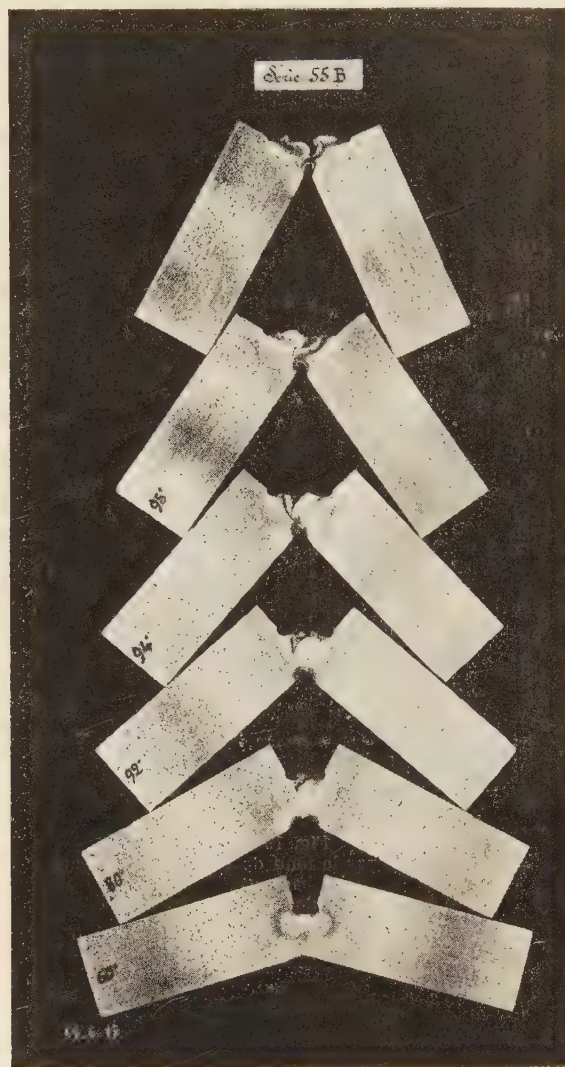


Fig. 18.

On voit la succession des profils des barreaux de 30×30 ayant supporté le choc du mouton tombant de 60, 80, 92, etc... degrés; le barreau supérieur a subi l'essai de résilience à hauteur de chute maxima.

ACIER DEMI-DUR E II

(Traité pour emplois usuels)

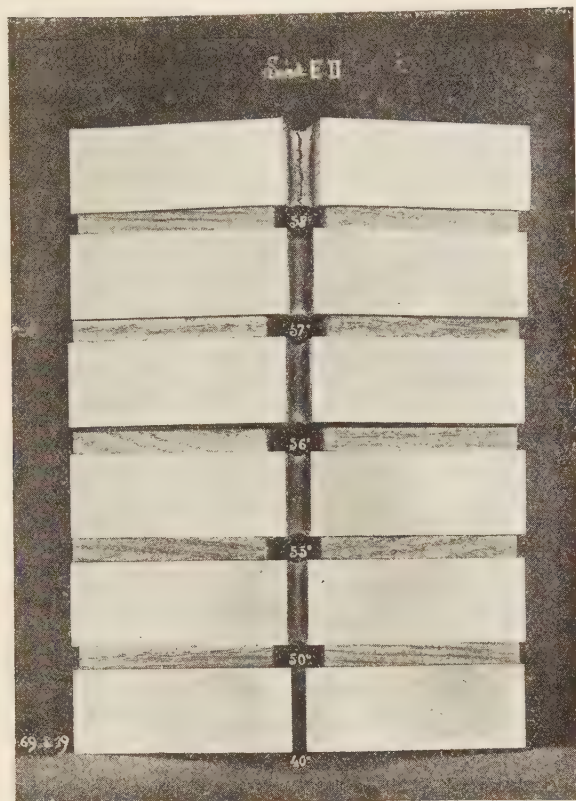


Fig. 19.
Aspect présenté par le fond de l'entaille de chacun
des barreaux
dont le profil est donné par la figure 20.
(A comparer à la série J IV).

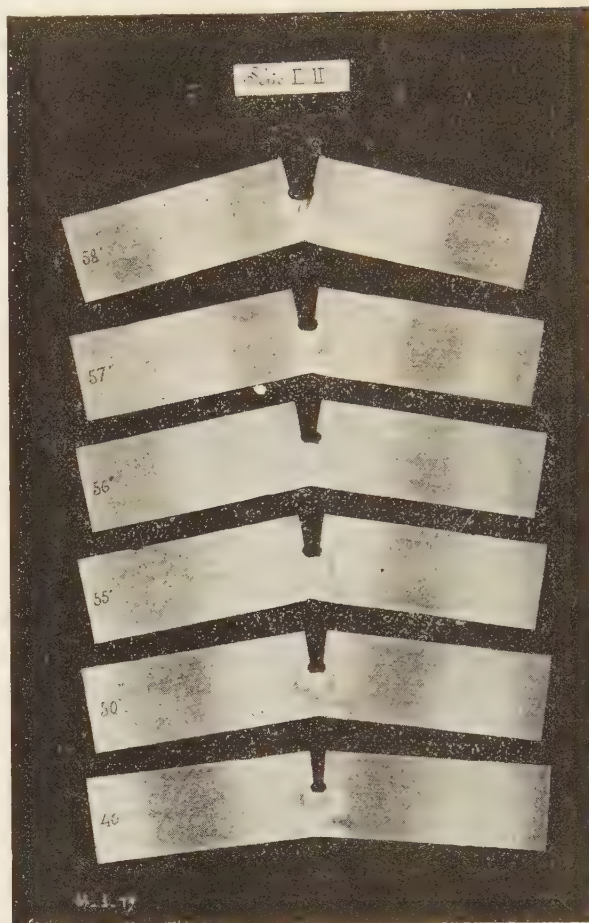


Fig. 20.

Succession des profils des barreaux de 30×30
ayant supporté un choc du mouton tombant de 4^0 , 50 , 55 ,
 56 etc... degrés. Pour une hauteur de chute de 57^0 , la fissure ne
débouche pas sur les flancs du barreau : pour 58^0 , elle tient la
moitié de l'épaisseur ; pour 59^0 , le barreau se rompt.
Il est intéressant de comparer cette série avec la série J IV, au
point de vue de la fissilité.

tes ; et d'abord, examinons le tableau VI qui permet de chiffrer les différences des résultats globaux obtenus lorsque la vitesse moyenne de l'épreuve varie de plusieurs mètres par seconde, à quelques centimètres à l'heure.

On voit que les travaux de rupture par action lente diffèrent, au maximum, et cela dans le cas

de l'acier extra-doux, de 23 % des travaux de rupture par choc. D'autre part, on constate que les courbes représentant les déformations des barreaux, en fonction des travaux absorbés, sont très voisines les unes des autres, presque superposables, que la sollicitation imposée soit vive ou lente. De l'ensemble de ces deux résultats, on

ACIER DEMI-DUR AU NICKEL J IV.

(Traité pour emplois usuels).

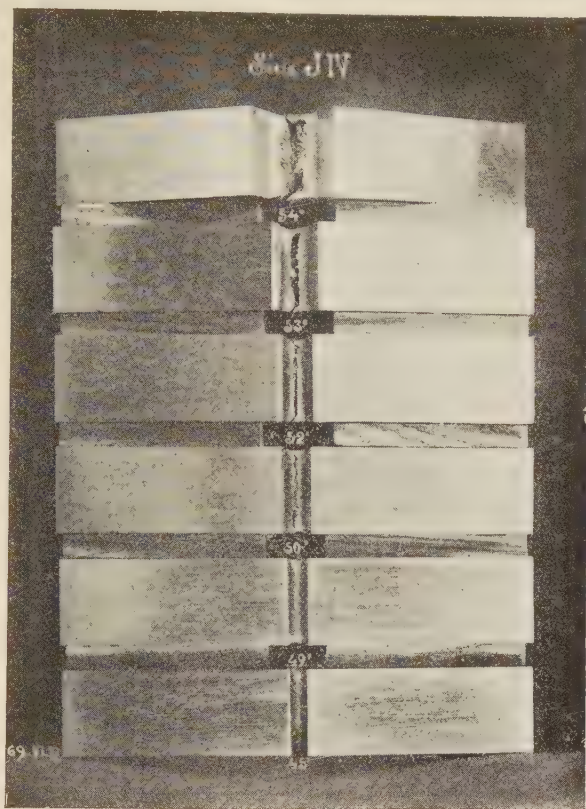


Fig. 21.

Aspect présenté par le fond de l'entaille de chacun des barreaux dont le profil est donné par la figure 22. On se rend compte nettement de la naissance et de la propagation de la fente au fond de l'entaille.



Fig. 22. — Succession des profils des barreaux de 30×30 ayant supporté un choc du mouton tombant de 45, 49, etc... degrés. On remarque que la fissure, débouchant sur les flancs du barreau, se propage beaucoup moins rapidement que dans le cas du mi dur sans nickel E II.

peut conclure qu'il n'y a pas de différence essentielle entre les mécanismes de ces 2 épreuves et que les observations faites sur l'une, sont, sous certaines réserves naturellement, applicables à l'autre. Par ailleurs, tout en constatant que les T_I sont, dans certains cas, nettement inférieurs aux T_c , on reconnaît que le classement des métaux reste le même, qu'on considère l'un ou l'autre mode d'essai, et on en déduit que l'influence de la vitesse d'impact, dans les limites de réalisation courante, est pratiquement négligeable.

A un autre point de vue, si l'on se reporte aux chiffres de la colonne 4 du précédent tableau, on remarque que les valeurs du rapport $\frac{T_I}{T_c}$ rapprochent l'un de l'autre le cuivre, et les aciers extra-doux n° 55 et dur au chrome et au nickel n° 31 : la considération de la fissilité nous avait conduit à un résultat analogue, dans l'étude de la sollicitation lente. Quant à l'alliage K, nous le trouvons, ici encore, dans le voisinage immédiat des aciers E II et J IV : ses propriétés particulières continuent à le placer tantôt à

ACIER DUR AU CHROME et AU NICKEL N° 31.

(Traité pour emplois usuels).

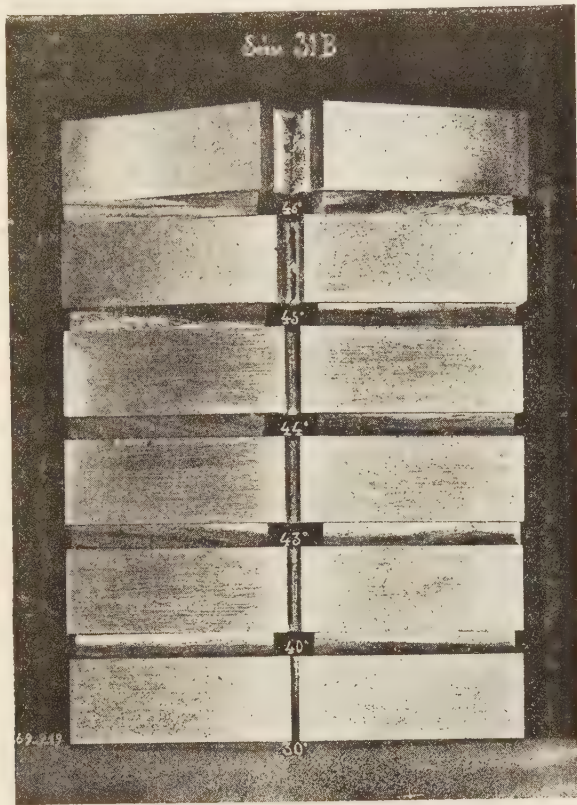


Fig. 23. — Aspect présenté par le fond de l'entaille de chacun des barreaux dont le profil est donné par la figure 24.

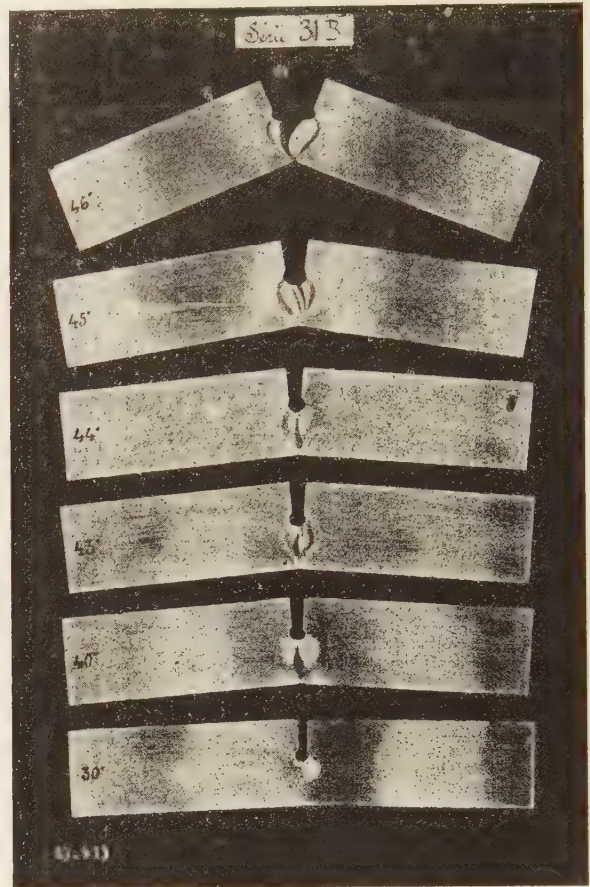


Fig. 24. — Succession des profils des barreaux de 30×30 ayant supporté un choc du mouton tombant de 30, 40, etc degrés. On constate que la fissure se propage ici presque aussi lentement que dans le cas du métal demi-dur au nickel.

côté des métaux mi-durs, tantôt à côté des aciers très résilients.

Examinons, maintenant, de plus près, l'allure des diagrammes « flèches — travaux absorbés ».

On constate que toutes ces courbes présentent, tout d'abord, une portion sensiblement rectiligne, peu inclinée sur l'axe des abscisses : puis, elles s'infléchissent brusquement, pour prendre une nouvelle direction, à peu près rectiligne également, mais très fortement inclinée sur l'axe des abscisses, la brisure étant plus accusée dans

le cas du choc que dans celui de l'action lente.

Le point où les deux portions de droite se rencontrent marque nettement le moment où le métal ne résiste plus aux efforts exercés et où il cède en absorbant des travaux de plus en plus faibles. Cet instant nous semble intéressant à considérer, car sa localisation dans l'échelle des travaux absorbés offre un nouveau moyen de classer le matériel : il est bien évident, en effet, que de 2 métaux présentant le même travail de rupture, celui qui pourra résister le plus longtemps

sans déformations excessives aux sollicitations imposées, présentera un coefficient de sécurité supérieur à l'autre.

D'un autre côté, il est utile d'examiner si la fissilité se manifeste de la même façon, pour les aciers considérés, au cours des deux modes de sollicitations étudiées, vive ou lente : nous trouverons une nouvelle confirmation de l'identité des deux mécanismes de rupture, si la répartition des phénomènes reste la même, dans l'un et l'autre cas.

C'est l'expression numérique de ces deux points de vue que nous cherchons à donner dans le Tableau VII.

Désignation des métaux (1)	Travail absorbé par le barreau au moment		Travail de rup- ture au choc T_c (4)	Rapports	
	de l'apparition de la crique au fond de l'entaille T_s (2)	du changement de direction de la courbe des déformations T_s (3)		$\frac{T_s}{T_c} \times 100$ (5)	$\frac{T_s}{T_c} \times 100$ (6)
	kgm.	kgm.	kgm.	%	%
Acier 55 B.	vers 70	164,48	186,18	41	37
— E II.	— 50	72,34	77,21	69	61
— J IV.	— 40	54,63	68,24	73	58
— 31	— 21	44,57	52,88	47	39
— K	— 79	94,25	112,27	83	70

TABLEAU VII

Les chiffres de la colonne 6 de ce tableau se suivent dans le même ordre que ceux de la colonne 7 du tableau IV, page 24 : il y a même une concordance tout à fait significative entre ces chiffres, pour les aciers E II, J IV et K. D'après cela, la propagation de la crique, une fois qu'elle est amorcée, ne semble pas se produire plus facilement dans le cas du choc que dans le cas

d'une vitesse d'essai extrêmement réduite. Dans les deux modes d'épreuves, les métaux se groupent de la même façon : d'une part, les aciers extra-doux et dur au chrome et au nickel (55 B et 31), d'autre part, les aciers mi-durs (E II et J IV), enfin l'alliage à 23 % de nickel, sous les mêmes réserves que précédemment.

Les chiffres de la colonne 5, qui donnent une idée de la répercussion de l'apparition de la crique sur la valeur des déformations subséquentes du barreau, conduisent à un classement analogue du matériel.

Toutes ces constatations concordent à faire ressortir l'identité du mécanisme de la rupture et des déformations successives qui la précèdent, que la sollicitation soit brutale ou progressive. Il en résulte que les observations auxquelles l'action lente a donné lieu sont applicables au choc : nous en présenterons l'ensemble quand nous aurons examiné le cas des petits barreaux, que nous abordons maintenant.

2° BARREAUX DE $10 \times 10 \times 53,3$. — Il peut paraître superflu, à priori, de reprendre sur les petits barreaux, l'exposé des recherches qui ont été effectuées sur les gros : mais, d'une part, les nouveaux résultats que nous rencontrerons ne seront pas toujours identiques aux précédents, et, d'autre part, nous aurons à les faire intervenir les uns et les autres dans l'étude de la loi de similitude. Nous allons donc procéder à un compte-rendu aussi succinct que possible de cette partie de notre travail.

a) *Action lente*. — Les diagrammes des essais par action lente, exécutés sur barreaux de 10×10 , prélevés chacun dans un des barreaux de 30×30 étudié, sont donnés par les figures n°s 25, 26, 27, 28, 29 et 30. Comme ci-dessus, nous transcrivons ici le tableau complet (tableau VIII) d'une des déterminations relatives à l'acier J IV : l'éprouvette de l'expérience porte le n° J_p IV 12 : c'est donc la deuxième barrette de 10×10 provenant du gros barreau J IV 1.

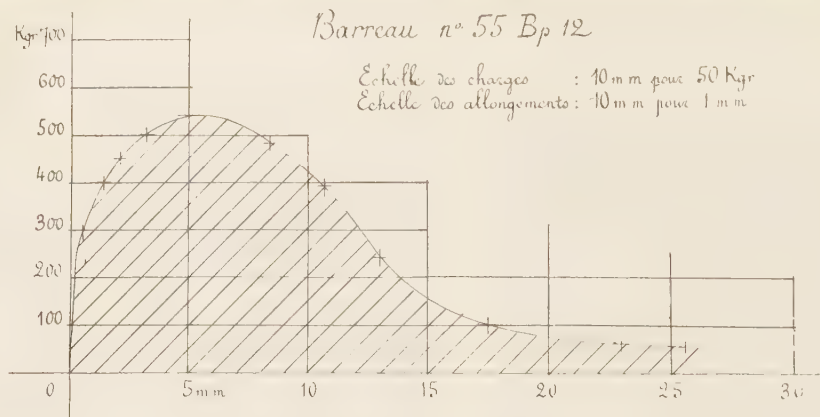


Fig. 25.

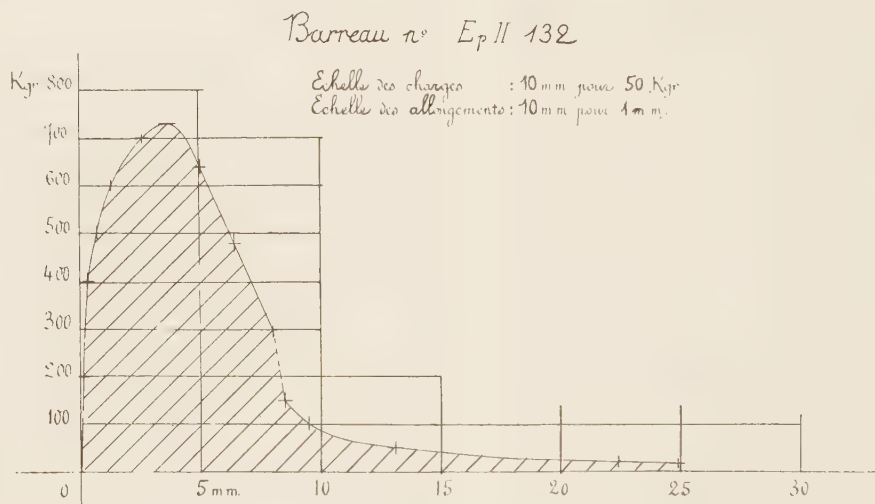


Fig. 26.

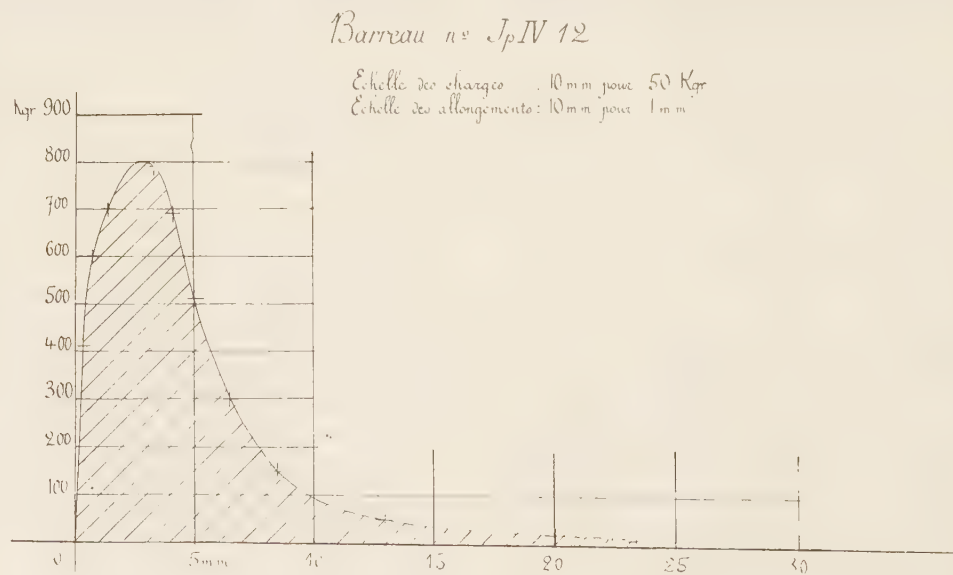


Fig. 27.

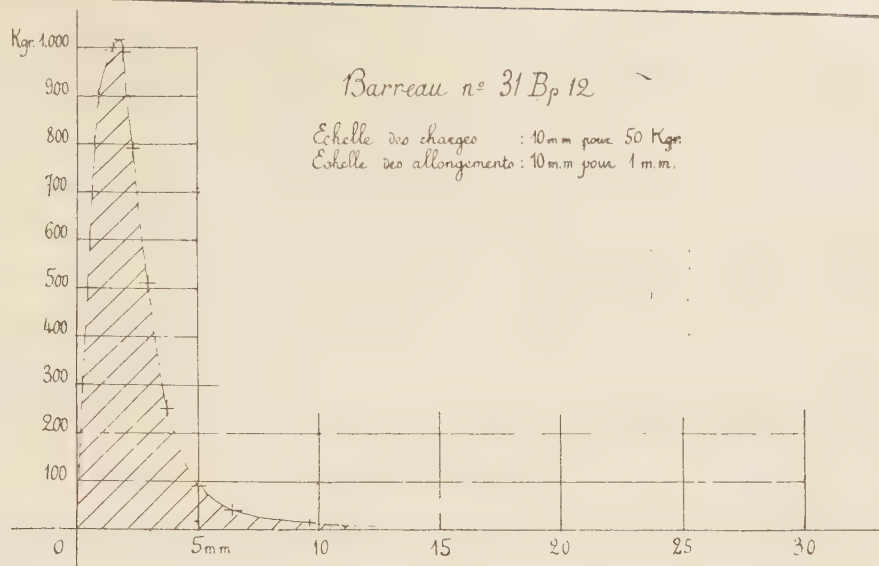


Fig. 28.



Fig. 29.



Fig. 30.

ESSAIS AU CHOC SUR ENTAILLES

Essai par action lente : barreau Jp IV 12.

Charges en kg.	Angles du barreau en degrés	Flèches mesurées sur l'appareil		Flèches relevées sur l'enregistreur		Planimétrage du diagramme construit		Observation du fond de l'entaille
		sous charge en mm.	sous 50 kg. en mm.	sous charge en mm.	sous 50 kg. en mm.	en mmq.	en kgm.	
20	»	13,68	»	»	»	»	»	Malgré l'évasement pratiqué, la petitesse de l'entaille empêche d'en observer le fond tant que la flèche du barreau n'a pas atteint une certaine valeur.
50	»	13,76	»	»	»	»	»	
200	»	13,92	13,81	»	»	»	»	
410	»	14,08	13,84	»	»	110	0,055	
600	2	14,54	14,21	2,7	»	540	0,270	
700	6	15,22	14,86	6,3	»	1.360	0,680	
800	13	16,54	16,13	13,3	»	3.400	1,700	
Tangente horizontale relevée sur la courbe						3.750	1,875	
790	16	17,10	16,71	16,8	»	4.400	2,200	Crique commençante. Crique sur 1/4 de la hauteur. Crique sur 2/3 de la hauteur. La crique débouche sur les côtés du barreau. La fissure s'étend sur 2 mm. des côtés. La fissure s'étend sur 3 mm. L'appareil n'est plus tendu.
680	20	17,40	17,55	21,5	»	5.600	2,800	
510	27	18,82	18,54	27,2	»	6.720	3,360	
300	35	20,26	20,02	36,0	»	7.890	3,945	
150	47°30'	22,31	22,11	48,3	»	8.750	4,375	
50	»	26,82	26,82	77,5	»	9.510	4,755	
20	»	33,87	»	115,5	»	9.990	4,995	
10	116	37,18	»	135,0	»	10.080	5,040	

TABLEAU VIII

On peut faire sur les diagrammes de traction lente donnés par les petits barreaux et sur les particularités qui se manifestent au cours de l'essai, les mêmes observations que pour les gros barreaux. Nous passerons donc sur la description de l'épreuve elle-même et nous nous bornerons à en examiner les grandeurs qui la définissent : elles sont rassemblées dans le tableau IX.

Nous retrouvons l'identité du classement des métaux opéré, en considérant soit les limites élastiques ou les limites de rupture à la traction, soit les charges correspondant au changement de direction et à la tangente horizontale de la courbe flèches-charges : les travaux θ_1 , absorbés par le barreau au moment de l'imposition de l'effort maximum et les travaux de rupture θ_l donnent exactement l'ordre inverse.

Dans l'ensemble, si on les compare aux rapports $\frac{T_1}{T_l} \times 100$ du tableau IV (page 24) les rapports $\frac{\theta_1}{\theta_l} \times 100$ correspondants ont subi une dimi-

Désignation des métaux	Changement de direction		Tangente horizontale		Travail de rupture θ_l	Rapport $\frac{\theta_1}{\theta_l} \times 100$
	Charge	Travail	Charge	Travail θ_1		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	kg.		kg.	kgm.	kgm.	%
Acier 55 B.	250	»	540	2,46	6,98	35
— E II.	350	»	730	2,15	5,33	40
— J IV.	500	»	800	1,87	5,04	37
— 31	800	»	1.035	1,30	2,86	45
— K.	400	»	710	3,19	5,33	59
Cuivre.	100	»	205	0,57	1,17	48

TABLEAU IX

nution notable, ce qui indique que les petits barreaux présentent une fissilité moindre que les gros barreaux dont ils proviennent.

On constate, d'autre part, qu'au point de vue de la fissilité le classement des métaux les uns par rapport aux autres, se trouve ici modifié d'une façon importante sur ce qu'il était d'après les résultats portés au tableau IV : si l'acier extradoux et l'alliage à 23 % de nickel conservent les places extrêmes, les deux demi-durs et le chrome-nickel dur se trouvent échangés, surtout du fait de la différence considérable qui se mani-

feste entre les $\frac{\theta_1}{\theta_2}$ (40 % pour E II et 37 % pour

J IV) et les $\frac{T_1}{T_2}$ (64 % pour E II et 58 % pour J

IV) des deux premiers. Nous reviendrons sur ces deux points lorsque nous examinerons la question de la loi de similitude.

Pour terminer, nous indiquerons, à titre documentaire, une série de déterminations par action lente, faites sur des barreaux de métal E II, tous trempés à l'eau à l'état de carrés de 15 mm., mais revenus à des températures différentes, comprises entre 400 et 650 degrés. Cette série est intéressante à considérer, bien qu'elle ne rentre pas exactement dans le cadre de notre programme, car elle permet de suivre la répercussion que la variation du revenu produit, d'une part, sur le diagramme de l'épreuve et le travail de rupture, et, d'autre part, sur la répartition de ce travail entre les périodes élémentaires, distinguées plus haut, dont il est la somme. En outre, elle permet de se rendre compte de la différence qui se manifeste, au point de vue de la résilience, entre un barreau de 10 × 10 traité à l'état de carré de 15 et un barreau de 10 × 10, prélevé dans un gros barreau traité de la même façon, mais à l'état de carré de 35.

Les diagrammes des figures 31, 33, 35 et 37 représentent les essais, et le tableau X, ci-contre, donne l'expression numérique des observations effectuées, ainsi que les caractéristiques mécaniques du métal à ses différents états (barrettes de 6 mm. de diamètre, repérées à 20 mm.) :

Désignation des Barreaux	Température de revenu	Essai de traction				Essai de flexion sur entaille		
		E	R	A	Σ	Travail absorbé		Rapport $\frac{\theta_1}{\theta_2} \times 100$
						à la tangente horizontale θ_1	à la rupture θ_2	
	degrés	kg/mmq	kg/mmq	%	%	kgm.	kgm.	%
09 M _p 4	650°	59,01	77,20	32,5	65,7	2,12	6,09	34
09 M _p 16	600	66,43	83,03	27,5	62,4	1,81	4,75	38
09 M _p 26	500	94,16	101,60	21,2	53,3	1,10	2,80	39
09 M _p 36	400	104,24	112,18	15,0	44,3	0,78	1,15	67

TABLEAU X

On constate que la résilience diminue avec la température de revenu, et à peu près proportionnellement à cette température, dans les limites considérées. La période de fissilité diminue dans les mêmes conditions, lentement d'abord, puis brusquement, de telle sorte que, pour un revenu de 400°, le travail absorbé dans la dernière phase de l'épreuve n'est plus que le tiers du travail de rupture, alors qu'il en était les deux tiers, dans le cas du revenu à 650°.

Les diagrammes illustrent, d'ailleurs, très clairement ces observations.

Nous voyons, d'autre part, que l'éprouvette E_p II 132 (tableau IX page 34 et diagramme de la figure 26) prélevée dans un barreau de 30 × 30, n'absorbait à la rupture que 5,33 kgm. alors que l'éprouvette 09 M_p 4, trempée et revenue comme la précédente, mais à l'état de carré de 15 (au lieu de 35) absorbe plus de 6 kgm. : cette remarque donne une idée de la sensibilité de l'essai de flexion sur entaille à la pénétration de la trempe.

Enfin nous constatons que le rapport $\frac{\theta_1}{\theta_2} \times 100$ relatif à l'éprouvette 09 M_p 4 (34 %) est voisin du même rapport relatif à l'éprouvette E_p II 132

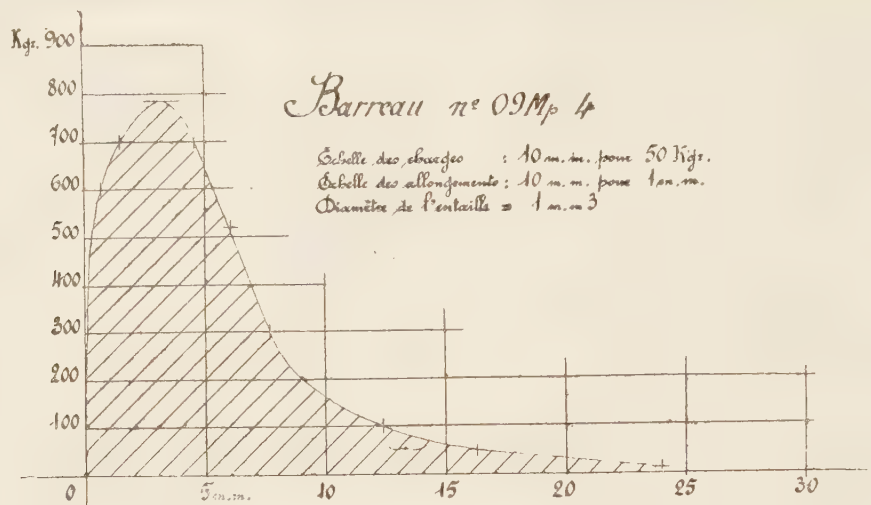


Fig. 31.

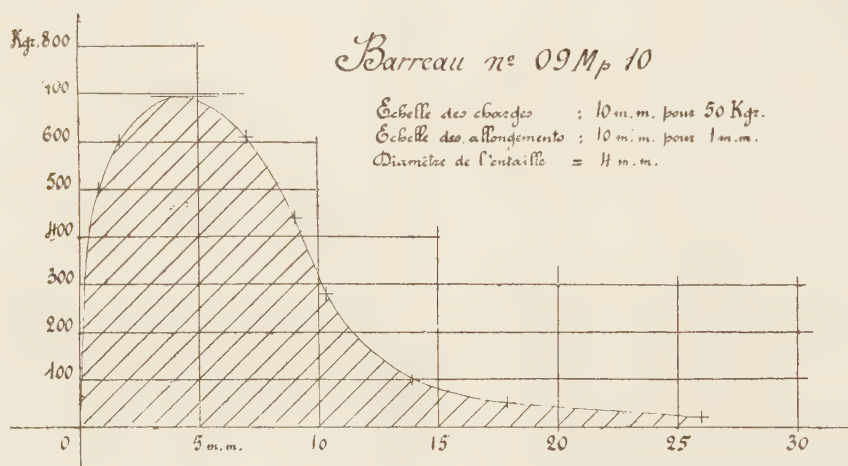


Fig. 32.

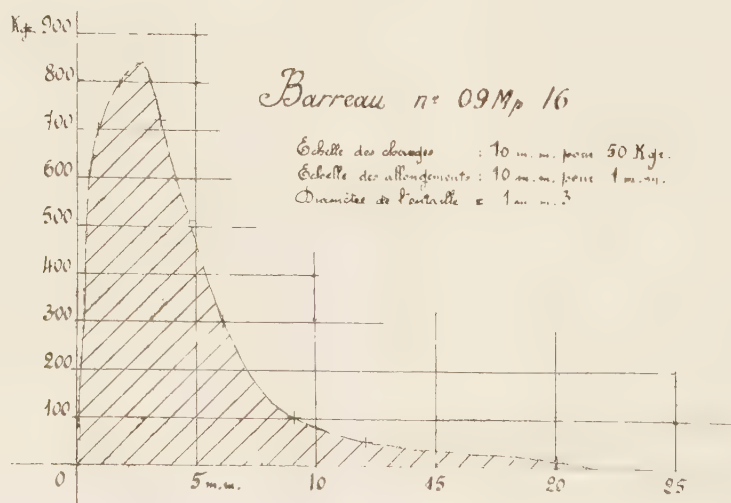
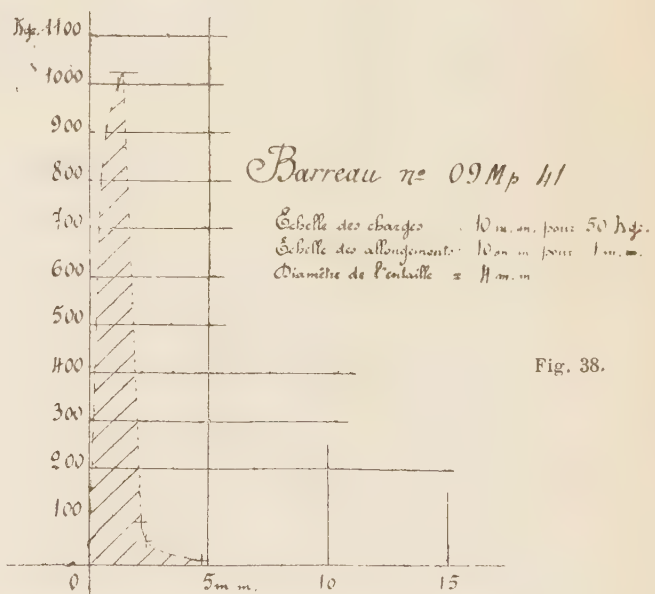
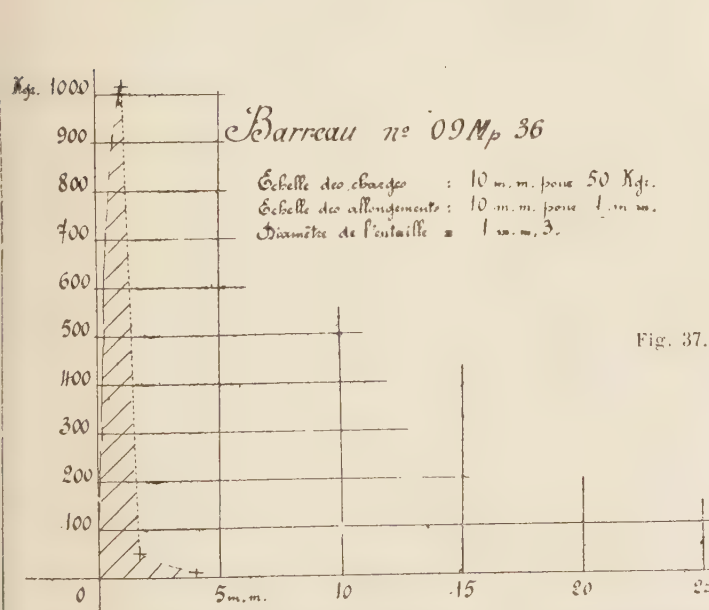
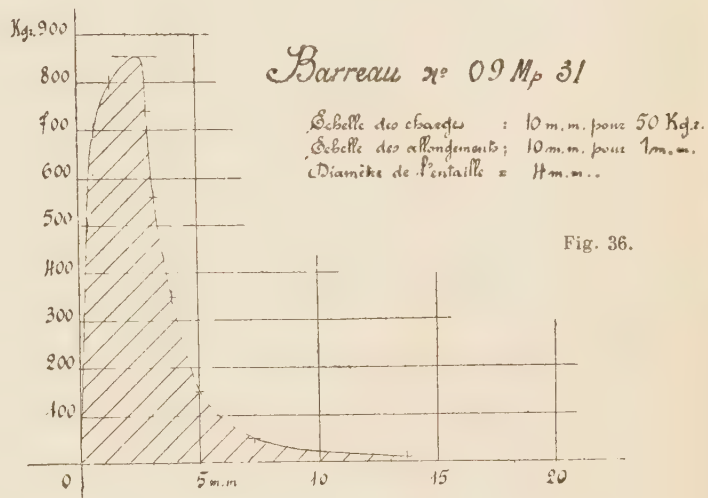
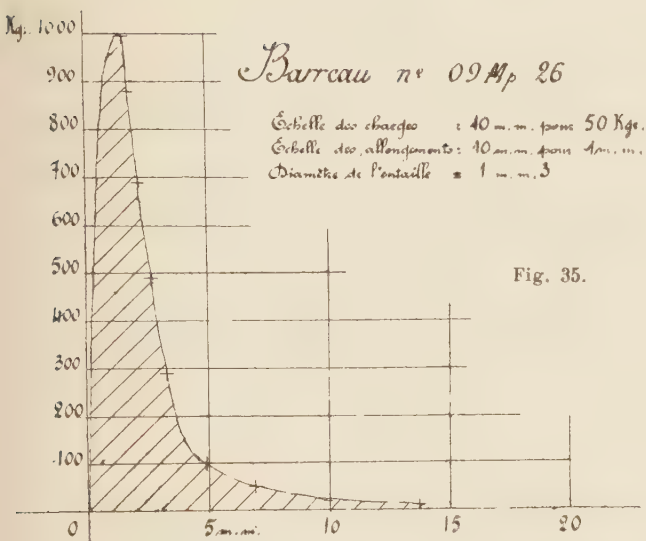
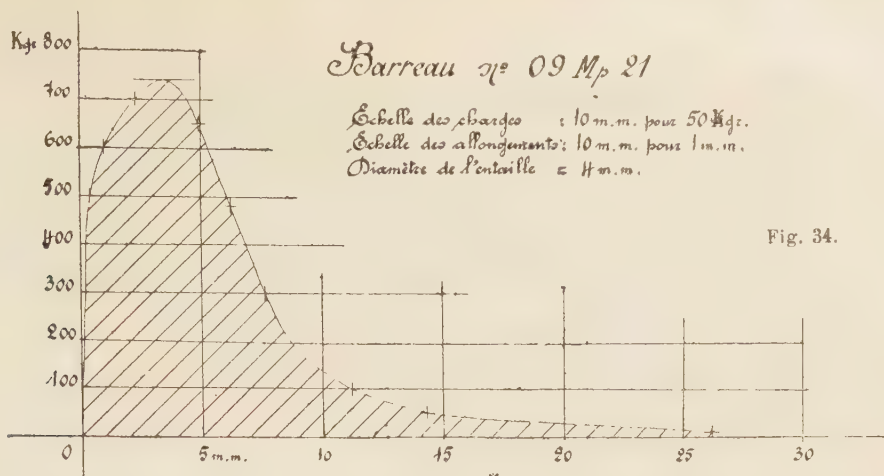


Fig. 33.



ESSAIS AU CHOC SUR ENTAILLES

Série de déterminations au choc sur acier J IV (barreaux de 10 × 10 × 53,3)

Désignation des barreaux	Remontée pendulaire		Angle du barreau (en degrés)	Travail absorbé (en kgm.)	Observation du fond de l'entaille
	à vide (en degrés)	après essai (en degrés)			
			(1)	(2)	
Jp IV 11	159° 2/10	124° /10	»	5,65	Rien Fortes gerçures au fond. Très légère crique sur les 3/4 de la hauteur. Barreau presque entièrement rompu. Fissure débouchant de 3 mm. sur les côtés du barreau. Crique sur les 4/5 de la hauteur. Fissure débouchant de 1,5 mm. sur les côtés du barreau. Fissure débouchant de 2 mm. sur les côtés du barreau : la crique du fond s'élargit. Anomalie (à écarter dans la construction de la courbe). Fissure débouchant de 2 mm. sur les côtés du barreau. Fissure débouchant de 2,5 mm. sur les côtés du barreau.
— 12	Essai par action lente				
— 13	21	arrêt	7	1,02	
— 14	30	arrêt	14	2,06	
— 15	37	arrêt	20	3,10	
— 16	159° 2/10	128°	»	4,89	
— 17	48	arrêt	72° 5/10	5,10	
— 18	47	arrêt	58	4,90	
— 111	40	arrêt	25	3,60	
— 112	Essai par action lente				
— 113	42	arrêt	32	3,96	
— 114	43	arrêt	36° 5/10	4,14	
— 115	159° 2/10	129°	»	4,68	
— 116	44	arrêt	57	4,32	
— 117	45	arrêt	35° 5/10	4,51	
— 118	46	arrêt	43	4,71	

Travail de rupture moyen de la série $\theta_c = 5,07 \pm 0,38$

TABLEAU XI

(40 %) et très différent du rapport $\frac{T_1}{T_l}$ relatif au gros barreau E II (64 %) : il ya donc bien, dans l'accroissement de la période de fissilité un caractère spécial à l'essai sur petites éprouvettes, qui n'est pas apparu par hasard.

b) *Choc*. — Le tableau IX donne tous les éléments d'une détermination par choc, sur barreau de 10 × 10 × 53,3, pour le métal J IV : les petites éprouvettes mises en œuvre, comme leur numérotage l'indique, ont été prélevées, les huit premières dans le gros barreau J IV 1, et les 8 dernières dans le gros barreau J IV 2.

Les diagrammes des figures 39, 40, 41 et 42, représentent, pour les aciers extra-doux, demi-durs et dur au chrome et au nickel, les courbes des déformations subies par les barreaux, au cours des épreuves par action lente, ou par choc, en fonction des travaux absorbés. Ces diagrammes confirment les conclusions précédentes

relatives à l'identité du mécanisme de rupture, que la sollicitation soit brusque ou progressive.

Voici, d'autre part, le tableau comparatif des travaux de rupture dans les 2 modes d'essai.

Désignation des Métaux (1)	Travail de rupture		
	Action lente θ_l en kgm. (2)	Choc θ_c en kgm. (3)	$\frac{\theta_l}{\theta_c} \times 100$ (4)
Acier 55 B	6,98	8,54	81 %
— E II	5,33	4,92	108
— J IV	5,04	5,07	99
— 31	2,86	3,17	90
— K	5,33	5,88	90
Cuivre légèrement oxydé .	1,17	1,44	81

TABLEAU XII

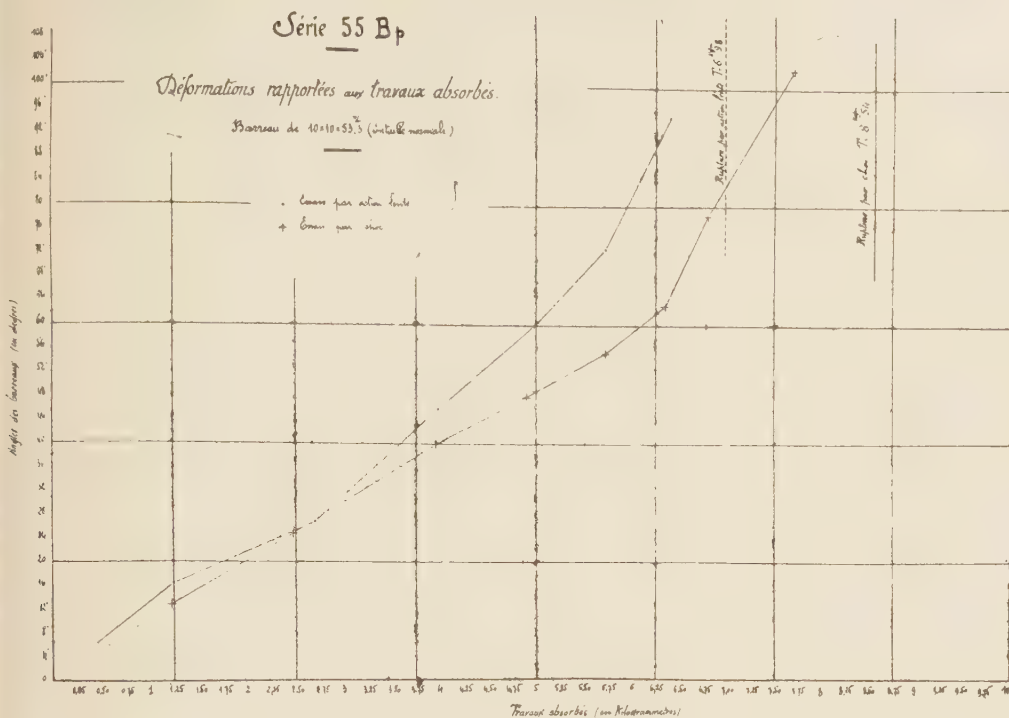


Fig. 39.

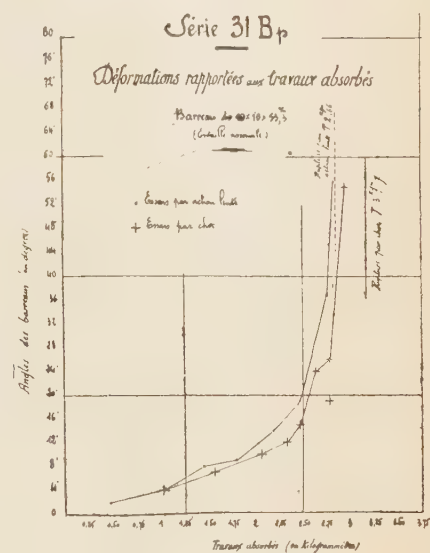


Fig. 42.

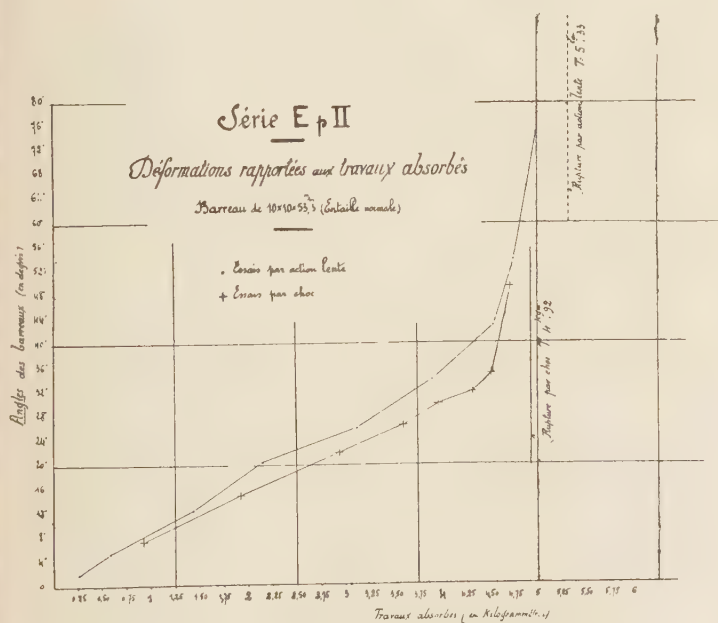


Fig. 40.

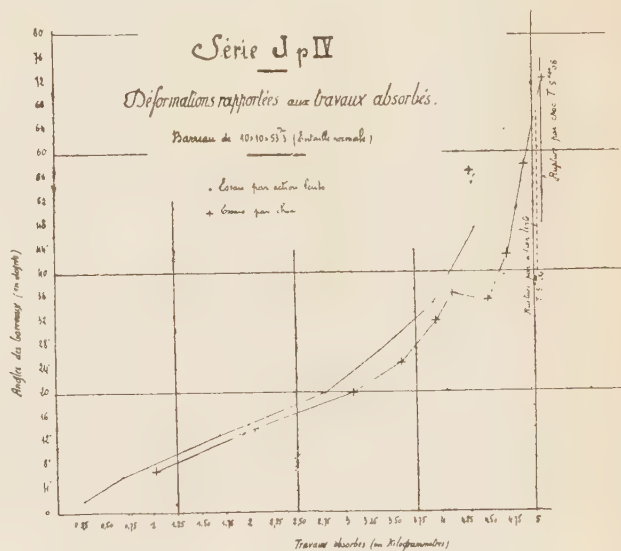


Fig. 41.

On constate que les valeurs des travaux absorbés par la rupture, après sollicitation vive ou lente, sont plus voisines les unes des autres dans le cas des barrettes de 10×10 , que dans le cas des gros barreaux, les rapports $\frac{\theta_l}{\theta_c} \times 100$ se trouvant

tous relevés dans des proportions analogues. Toutefois la considération de ces rapports $\frac{\theta_l}{\theta_c} \times 100$

nous permet encore de rapprocher, 2 à 2, les aciers de la suite examinée, suivant un groupement que nous avons déjà rencontré, à savoir : acier extra-doux et cuivre, chrome-nickel dur et alliage à 23 % de nickel, et enfin les 2 demi-durs.

Pour le demi-dur ordinaire E II, contrairement à ce qui se passe pour tous les autres métaux de la série, l'essai lent donne une résilience légèrement supérieure à celle de l'essai par choc. Ce résultat, qui a été vérifié à plusieurs reprises, tient vraisemblablement à ce que la trempe produit sur ce type d'acier, un effet énergétique, mais superficiel : il s'ensuit que le centre du carré de 30, dans lequel les petites éprouvettes ont été prélevées, se trouve dans un état physique intermédiaire entre l'état trempé et revenu et l'état recuit, état recuit pour lequel, comme nous le montrons plus loin, le rapport $\frac{\theta_l}{\theta_c}$ est notablement supérieur à l'unité.

3° CONCLUSIONS RELATIVES A L'INFLUENCE DE LA VITESSE D'IMPACT. — Comme conclusion à l'étude que nous venons de faire, sur gros et petits barreaux, d'un ensemble de métaux bien déterminés, nous croyons pouvoir retenir les points suivants : de façon générale, le travail de rupture par sollicitation lente (vitesse : 60 mm. à l'heure) est inférieure de 10 à 20 % au travail de rupture par sollicitation vive (vitesse : 9 m. par seconde) : seul l'acier mi-dur, dans certaines conditions de prélèvement des petits barreaux, fait exception à cette règle générale. Mais cette exception est justiciable d'une interprétation satisfaisante, se rapportant à un ordre de faits connus sous le nom de pénétration de la trempe :

elle a surtout l'intérêt de mettre en lumière la difficulté que présente la localisation judicieuse des barreaux d'essai dans les grosses pièces, lorsqu'on se propose de chiffrer la qualité globale d'un matériel au point de vue de la fragilité.

D'autre part, l'étude attentive des phénomènes, qui constituent l'essai de flexion sur entaille, montre que le mécanisme de la rupture reste très sensiblement le même, qu'on procède par choc ou par action lente.

De l'ensemble de ces deux résultats, obtenus dans des conditions essentiellement différentes, on peut conclure que l'influence de la vitesse, dans les limites usuelles, c'est-à-dire lorsque la hauteur de chute varie entre 3 et 4 m. par seconde pour les gros barreaux et entre 1,50 et 2 m. pour les petits, est pratiquement négligeable, et, tout au plus, de l'ordre des écarts présentés par les déterminations courantes.

L'analyse de la rupture par sollicitation lente étant applicable à la sollicitation brusque, on est amené à décomposer le phénomène de choc en trois phases principales : les 2 premières classent les métaux comme le fait l'essai de traction : la troisième, période de fissilité, conduit à un groupement assez différent du matériel étudié, dans lequel le cuivre, l'acier extra-doux et le chrome-nickel dur sont rapprochés les uns des autres, et distingués des aciers mi-dur et mi-dur au nickel.

Cette considération de la fissilité, jointe à la considération de la résilience, semble pouvoir éventuellement servir à préciser la notion de fragilité en elle-même.

B) Influence du diamètre de l'entaille. — Pour les raisons indiquées dans l'Exposé des Méthodes adoptées, au commencement du présent travail, (voir page 17), nous nous sommes borné à examiner les entailles rondes, pratiquées au foret, et à mi-épaisseur. En outre, et pour ne pas augmenter indéfiniment le poids du matériel mis en œuvre, nous n'avons fait porter les expériences que sur des barreaux de $10 \times 10 \times 53,3$.

Les métaux choisis sont, l'acier extra-doux 55 B, les métaux demi-durs E II et J IV (au

Désignation des Métaux (1)	Travaux de rupture correspondant aux entailles de				Rapport $\frac{\theta_{1,3}}{\theta_4} \times 100$ (6)
	$d = 1,3 \text{ mm.}$ $\theta_{1,3}$ en kgm. (2)	$d = 2 \text{ mm.}$ θ_2 en kgm. (3)	$d = 3 \text{ mm.}$ θ_3 en kgm. (4)	$d = 4 \text{ mm.}$ θ_4 en kgm. (5)	
Acier 55 B	$8,56 \pm 0,07$	$8,18 \pm 0,07$	$8,93 \pm 0,19$	$9,06 \pm 0,19$	94 %
— E II	$5,65 \pm 0,11$	$5,77 \pm 0,33$	$5,94 \pm 0,62$	$6,68 \pm 0,47$	84 %
— J IV	$5,16 \pm 0,05$	$5,60 \pm 0,39$	$5,88 \pm 0$	$6,56 \pm 0,12$	78 %
— 31	$3,38 \pm 0,10$	$3,62 \pm 0,05$	$3,87 \pm 0$	$4,12 \pm 0,15$	82 %
— K	$5,88 \pm 0,22$	»	»	$8,31 \pm 0,30$	70 %

TABLEAU XIII

nickel), l'acier 31 dur au chrome et au nickel et l'alliage K à 23 % de nickel : les diamètres des entailles pratiquées sont de 1,3 mm., 2 mm., 3 mm. et 4 mm. Après avoir vérifié un grand nombre de fois l'ordre de grandeur des phénomènes observés, nous nous contentons, dans l'expérience définitive présentée ici, de casser deux barreaux par type d'entaille : cette réduction du nombre des essais, qui n'a pas d'inconvénients puisque nos déterminations sont régulières, permet de prélever une série complète (8 éprouvettes) dans les deux fragments du même barreau de 30×30 et d'amener ainsi, au maximum, l'homogénéité de la matière, d'une barrette à l'autre. D'autre part, cette façon de procéder nous met en possession de résultats qu'il sera légitime de faire intervenir, le moment venu, dans l'étude projetée de la loi de similitude.

Le compte-rendu des déterminations effectuées est donné dans le tableau XIII.

On constate que, pour tous les métaux étudiés, la valeur des travaux de rupture s'élève d'une façon nette et progressive avec le diamètre de l'entaille : cette augmentation est, néanmoins, relativement assez faible, si bien que dans le cas où le phénomène est le plus accusé, (alliage K à 23 % de nickel) le travail de rupture sur entaille

de 1,3 mm. ne diffère que de 30 % du travail de rupture sur entaille de 4 mm. Il faut, en outre, remarquer que le classement des métaux, les uns par rapport aux autres, dans l'échelle des résiliences, n'est nullement modifié par la variation du facteur étudié, dans les limites considérées.

Si l'on se reporte au tableau donnant les caractéristiques mécaniques des métaux mis en œuvre (page 18) on observe que le métal le moins sensible à la modification examinée ici est l'acier extra-doux (55 B) et que le métal le plus sensible à cette modification est l'acier à 23 % de nickel (K) : ce sont également ces 2 alliages que la considération de la différence entre la limite de rupture et la limite d'élasticité différencie le plus nettement.

$$45,5 - 33,1 = 12,4 \text{ pour l'acier 55 B}$$

et

$$76,2 - 34,7 = 41,5 \text{ pour l'acier K.}$$

Pour terminer, nous chercherons à préciser l'influence de la variation du diamètre de l'entaille sur le mécanisme de la rupture, en considérant le cas de l'essai par action lente, et en faisant intervenir la série des barreaux 09M_p (métal E II : barreaux traités à l'état de carrés de 15 : trempés à l'eau et revenus à diverses tempé-

ESSAIS AU CHOC SUR ENTAILLES

ratures) à laquelle nous avons déjà fait appel antérieurement (voir page 35). Le tableau ci-dessous donne les renseignements que nous considérons habituellement dans ce genre d'épreuves, pour des barreaux traités, deux à deux, de façon identique, mais entaillés soit au diamètre de 1,3 mm., soit au diamètre de 4 mm. : les diagrammes de ces derniers sont donnés par les figures 32, 34, 36 et 38 ; les diagrammes des premiers, déjà cités, sont donnés par les figures 31, 33, 35 et 37.

Désignation des Barreaux	Températures de revenu en degrés	Diamètres de l'entaille en mm.	Travaux absorbés (action lente)		Rapports $\frac{\theta_1}{\theta_2} \times 100$ %
			à la tangente horizontale : θ_1 en kgm.	à la rupture θ_2 en kgm.	
09 M _p 4 — M _p 10	650	1,3	2,12	6,09	34
		4,0	2,44	7,01	34
09 M _p 16 — 21	600	1,3	1,81	4,75	38
		4,0	2,18	5,63	38
09 M _p 26 — 31	500	1,3	1,10	2,80	39
		4,0	1,75	3,17	55
09 M _p 36 — 41	400	1,3	0,78	1,15	67
		4,0	1,06	1,56	59

TABLEAU XIV

On aurait pu croire que la variation du diamètre de l'entaille produirait un trouble sensible dans la répartition, entre ses différentes périodes, du travail de rupture : mais il n'en est rien. On constate, en effet, que la différence d'entaillage ne modifie le rapport $\frac{\theta_1}{\theta_2}$ ni pour un revenu à 650° (34 % et 34 %), ni pour un revenu à 600° (38 % et 38 %) : ces rapports sont encore très voisins l'un de l'autre pour le revenu à 400° (59 % et 67 %) ; quant à l'écart rencontré pour le revenu à 500°, on peut le considérer

comme dû à la manifestation d'une période de transition qui s'est produite plus tôt pour le barreau n° 31 que pour le barreau n° 26.

Ces observations sont applicables à l'essai au choc, car, comme on peut en juger par le tableau suivant, les sollicitations brusque ou progressive donnent, encore ici, des résultats très voisins l'un de l'autre.

Désignation des aciers	Températures de revenu	Travaux de rupture au choc sur		Rapport $\frac{\theta_{1,3}}{\theta_4} \times 100$
		entaille de d = 1,3 mm.	entaille de d = 4 mm.	
Acier 09M trempé à l'eau à 850°	650°	7,51 ± 0,08	8,45 ± 0,11	88 %
	600	6,41 ± 0,05	7,07 ± 0,10	90
	500	4,30 ± 0,15	5,29 ± 0,31	81
	400	1,00 ± 0,03	2,63 ± 0,19	38

TABLEAU XV

Nous pouvons donc conclure ainsi :

L'augmentation du diamètre de l'entaille, dans les limites fixées et pour les métaux de la suite examinée, produit, de façon générale, un accroissement de la valeur de la résilience qui ne dépasse pas 20 à 30 % (le cas du revenu à 400° n'est pas à retenir dans une étude relative à des métaux traités pour emplois usuels), affecte de la même façon l'ensemble des aciers mis en œuvre, et n'introduit aucun trouble dans le classement du matériel. Il est donc indifférent de choisir, pour les essais courants, un diamètre d'entaille plutôt qu'un autre entre 1,3 mm. et 4 mm. (ce qui ne fait que déplacer le zéro de l'échelle des résiliences) et on peut considérer l'influence de ce facteur comme pratiquement négligeable.

D'un autre côté, la variation du diamètre de l'entaille ne paraît pas agir de façon sensible sur le mécanisme de rupture, dont les différentes périodes sont modifiées proportionnellement.

C) Loi de similitude. — Nous avons exposé plus haut (voir page 6) quelles étaient, suivant le Capitaine Mimey, les conditions à réaliser sur 2 machines de choc, pour que deux barreaux semblables, de même matière, donnent des résiliences identiques.

Toutefois, il nous a paru inutile d'introduire dans nos essais des difficultés d'expériences supplémentaires, puisque nous avons reconnu, d'autre part, que pour les métaux qui nous occupent à l'heure actuelle, le travail de rupture était sensiblement indépendant de la vitesse d'impact et du poids du mouton (1). Nous nous sommes donc borné à réaliser, sur nos 2 machines, des distances d'appuis (facteur intervenant de façon prépondérante) rigoureusement proportionnelles, dans le rapport de similitude (3) des barreaux de $30 \times 30 \times 160$ et de $10 \times 10 \times 53,3$ mm.

C'est sous cette réserve que nous nous proposons de comparer maintenant, les résultats obtenus, tant au choc que par action lente, sur des éprouvettes semblables. Nous rappelons que la vérification rigoureuse de la loi de similitude exigerait, que, si l'on désigne par T et θ les travaux de rupture, par S et s les sections des gros et petit barreaux, la relation $\frac{T}{S} = \frac{\gamma}{s}$ fût satisfaite ; mais, comme $S=9s$, cette relation se réduit à $T=9\theta$.

C'est donc le rapport $\frac{T}{\theta}$ que nous allons examiner maintenant.

Le tableau XVI montre que les valeurs des rapports $\frac{T}{\theta}$ par action lente ou par choc sont bien concordants, ce qui met en évidence, une fois de plus, l'identité du mécanisme des sollicitations vive ou progressive. Ce tableau XVI fait ressortir, en outre, que, pour tous les métaux étudiés, le rapport $\frac{T}{\theta}$ est notablement supérieur à 9 ; c'est pour l'acier extra-doux (55 B)

(1) Les métaux qui interviennent dans ce chapitre sont très voisins de ceux qui ont fait l'objet du travail déjà cité de MM Georges Charpy et André Cornu-Thénard : les conclusions de ce travail sont donc applicables ici.

Désignation des Métaux	Travaux de rupture					
	par choc			par action lente		
	sur barreaux de $30 \times 30 \times 160$ T_c	sur barreaux de $10 \times 10 \times 53,3$ θ_c	$\frac{T_c}{\theta_c}$	sur barreaux de $30 \times 30 \times 160$ T_l	sur barreaux de $10 \times 10 \times 53,3$ θ_l	$\frac{T_l}{\theta_l}$
Acier 55 B .	186,18	8,54	21,8	142,31	6,98	20,3
— E II	77,21	4,92	15,6	73,80	5,33	13,8
— J IV .	68,24	5,07	13,4	67,05	5,04	13,3
— 31. .	52,88	3,17	16,6	44,35	2,86	15,5
— K. .	112,27	5,88	19,0	109,70	5,33	20,5
Cuivre oxydé	27,67	1,44	19,2	22,10	1,17	18,8

TABLEAU XVI

et l'acier à 23 % de nickel, qu'il est le plus élevé et voisin de 20 ; c'est pour les aciers demi-durs (E II et J IV) qu'il est le plus bas et voisin de 13 à 14.

Il est intéressant, dans ces conditions, de rechercher si la loi de similitude s'applique à l'une des périodes élémentaires de l'essai, en particulier, à la phase aboutissant à la tangente horizontale, pendant laquelle semblent n'intervenir que des caractéristiques définies par la traction, et, éventuellement, de déterminer l'époque où se produit la discordance entre l'hypothèse et les faits observés. A cet effet, considérons l'épreuve par sollicitation lente, et formons, pour les gros et les petits barreaux, le tableau comparatif des travaux absorbés, d'une part, depuis le commencement de l'essai jusqu'à l'apparition de la crique, et, d'autre part, depuis l'apparition de la crique jusqu'à la rupture. C'est l'objet du tableau XVII.

On constate que, pour tous les aciers étudiés, le rapport $\frac{T_1}{\theta_1}$ est notablement supérieur, et que,

corrélativement, le rapport $\frac{T_1 - T_2}{\theta_1 - \theta_2}$ est notablement

ESSAIS AU CHOC SUR ENTAILLES

Désignation des Métaux	Gros barreaux Travaux absorbés			Petits barreaux Travaux absorbés			Rapports		
	à l'apparition de la crique T_i	après la crique $T_l - T_i$	par la rupture T_l	à l'apparition de la crique θ_i	après la crique $\theta_l - \theta_i$	par la rupture θ_l	$\frac{T_l}{\theta_l}$	$\frac{T_i}{\theta_i}$	$\frac{T_l - T_i}{\theta_l - \theta_i}$
Acier 55 B	61,90	80,41	142,31	2,46	4,52	6,98	20,3	25,1	17,7
— E II	47,20	26,60	73,80	2,15	3,18	5,33	13,8	21,9	8,3
— J IV	38,80	28,25	67,05	1,87	3,17	5,04	13,3	20,7	8,9
— 31	23,70	20,65	44,35	1,30	1,56	2,86	15,5	18,2	13,2
— K	76,70	33,00	109,70	3,19	2,14	5,33	20,5	24,0	15,4
Cuivre oxydé	11,35	10,75	22,10	0,57	0,60	1,17	18,8	19,9	17,9

TABEAU XVII

inférieur au rapport $\frac{T_l}{\theta_l}$. Pour les métaux E II et J IV, en particulier, le rapport des travaux absorbés au cours de la période de fissilité est voisin de 9, alors que, au cours de la période antérieure, ce rapport est voisin de 20. Pour les trois autres aciers, qui se trouvent ainsi rapprochés les uns des autres, les différences sont moins accentuées. Les gros et les petits barreaux ont donc une façon très différente de se comporter, même quand ils subissent des efforts proportionnels, transmis par des organes géométriquement semblables, et cela, pendant toute la durée de l'épreuve ; ces observations soulignent, mais sans l'expliquer, la discordance existante entre les résiliences sur éprouvettes de 30×30 et les résiliences sur éprouvettes de 10×10.

Devant ces résultats assez surprenants, surtout en ce qui concerne les deux premières phases de l'essai, on peut se demander, si la discordance, qui se manifeste ici, n'est pas plus apparente que réelle, et si elle n'est pas introduite par le mode d'entaillage choisi. Est-il normal, en effet, d'adopter, pour les petits barreaux, un diamètre d'entaille proportionnel à celui des gros barreaux ? Ce diamètre n'intervient-il pas dans ses rapports avec la grosseur des éléments constitutifs du métal, et ne conviendrait-il pas de prêter à cette considération une influence plus décisive

qu'à l'application rigoureuse de la similitude géométrique ?

Si ces suggestions étaient fondées, on devrait, pour les éprouvettes de 10×10, trouver entre 1,3 mm. et 4 mm., un diamètre d'entaille qui amènerait la résilience de ces éprouvettes au voisinage de la résilience des barreaux de 30×30. Mais l'expérience ne corrobore pas ce point de vue : ainsi, si l'on pratique, sur les deux types de barreaux, des entailles de 4 mm. de diamètre, on trouve pour l'acier extra-doux 55 B :

$$\frac{T_c}{\theta_c} = \frac{186,18}{9,06} = 20,5$$

et pour l'acier K, à 23 % de nickel (cas le plus favorable : c'est le métal le plus sensible à l'accroissement du diamètre de l'entaille),

$$\frac{T_c}{\theta_c} = \frac{112,27}{8,31} = 13,5.$$

Il n'y a, évidemment, aucune raison d'aller plus loin dans cette voie. Mais on peut encore se demander s'il ne faut pas incriminer les machines employées et prétendre qu'elles ne donnent pas la mesure absolue du travail de rupture, en raison des phénomènes étrangers (vibrations, déformations, etc...), qui interviennent dans les déterminations, tout en échappant à nos calculs ? La comparabilité très satisfaisante des résultats obtenus sur des moutons de caractéristiques et

de principes nettement différents semble contredire cette hypothèse.

Faut-il, d'autre part, chercher l'explication des faits qui nous occupent, dans l'inégalité de pénétration des traitements à l'intérieur du métal, inégalité que l'épreuve à la bille serait impuissante à déceler et dont l'essai sur entaille serait le révélateur approprié ? (Ce phénomène agit certainement dans le cas de l'acier demi-dur, comme nous l'avons fait ressortir antérieurement). Mais alors pourquoi le cuivre recuit, et pourquoi les aciers recuits avec le plus grand soin (nous en verrons des exemples dans la suite) présenteraient-ils la même anomalie ?

Devant cet ensemble d'observations et dans l'état actuel de nos connaissances, il semble prudent d'enregistrer purement et simplement le fait : la loi de similitude, qui rend bien compte des essais de flexion ordinaires, ne s'applique pas aux essais de flexion sur entaille.

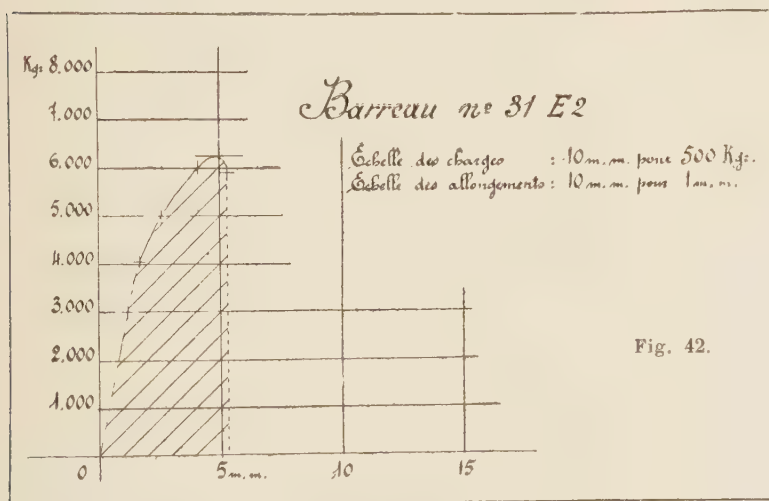


Fig. 42.

CAS PARTICULIER : MÉTAUX RECUITS

Pour éviter d'accumuler un trop grand nombre de documents, nous nous bornerons à examiner ici le cas de l'acier 31 dur au chrome et au nickel recuit (état E) pour lequel la régularité des essais et la mise en évidence des phénomènes étudiés est plus facile à réaliser. Nous ne ferons intervenir qu'incidemment l'acier E II demi-dur, et, à titre de comparaison.

A) Influence de la vitesse de l'essai. — 1° BARREAUX DE 30 × 30 × 160 (acier 31 E recuit).

— a) *Action lente.* — Le diagramme de l'essai est donné par la figure 42 (barreau 31 E 2). Si l'on compare cette courbe à celle qui a été obtenue à l'aide du barreau 31 C 2, du même métal mais trempé et revenu (figure 9), on constate immédiatement que les 2 allures

en sont nettement différentes : l'une, celle du métal traité, monte rapidement et se poursuit de façon continue, après son maximum, jusqu'à ce que la charge soit revenue à zéro ; le barreau ne cède pas. Pour l'autre, au contraire, le coefficient angulaire de la portion rectiligne initiale est moindre, la charge maxima sensiblement plus basse, et la courbe s'interrompt brusquement, sitôt passée la tangente horizontale, indiquant la rupture prématurée du barreau. Le tableau suivant permet d'ailleurs de chiffrer les caractéristiques principales de ces diagrammes.

Désignation des Barreaux	Pente de la portion rectiligne initiale	Changement de direction		Tangente horizontale		Travail de rupture T_r	Rapport $\frac{T_r}{T_l} \times 100$
		Charge	Travail	Charge	Travail T_l		
31 C 2 (trempé et revenu)	10/100	kg. 6.000	kgm. 3,4	kg. 8.200	kgm. 23,70	kgm. 44,35	% 53
31 E 2 (recuit)	20/100	3.750	2,8	6.250	20,25	23,30	86

TABLEAU XVIII

On constate, à nouveau, ici (voir page 24) que les charges et les travaux absorbés correspondant au changement de direction et à la tangente horizontale, sont sensiblement entre eux comme les limites élastiques et les limites de rupture du métal aux 2 états B ou C et E considérés (voir tableau II des caractéristiques mécaniques, page 18). Mais tandis que le travail absorbé au point de tangence horizontale, c'est-à-dire au moment de l'apparition de la crique au fond de l'entaille, n'est, pour le métal recuit, que de 15 % inférieur au travail correspondant pour le métal traité, le travail total de rupture du premier n'est presque que la moitié du travail de rupture total du second. Les premières périodes de l'essai ne sont donc pas modifiées de façon sensible, dans le cas qui nous occupe, par la mauvaise qualité du traitement thermique ; mais c'est la fissilité qui est développée considérablement.

Ces observations nous permettent de reprendre l'idée que nous avons signalée antérieurement, et d'introduire la notion de fissilité dans la définition d'un acier fragile. Il est bien évident qu'un acier à haute résilience ne sera jamais considéré comme fragile, même si le travail absorbé dans la période de fissilité est *relativement* peu élevé (métal K, page 24) ; mais on ne considérera un métal à basse résilience comme fragile, que si le travail absorbé dans la période de fissilité n'est qu'une faible portion du travail de rupture total, par exemple 10 ou 20 %. Ainsi, de ce point de vue, le chrome-nickel dur ne serait pas fragile à l'état trempé et revenu (travail de rupture = 44,35 kgm. ; période de fissilité 47 %) ; il serait au contraire très fragile à l'état recuit (travail de rupture = 23,30 kgm. ; période de fissilité 14 %). De même, pour une résilience très basse, correspondant à un travail de rupture de 22,10 kgm. seulement, le cuivre oxydé envisagé au chapitre précédent, ne serait pas classé « fragile », parce que le travail de fissilité (10,75 kgm.) se présente, comme étant les 49/100^e du travail total de rupture.

En tout état de cause, les observations précé-

dentes soulignent le rôle prépondérant des traitements thermiques et montrent combien il est dangereux de ne faire subir qu'un simple recuit de forge aux pièces de machines de quelque importance, même lorsqu'elles sont constituées en aciers de première qualité.

b) *Choc*. — Les 2 barreaux de 30 × 30 du métal 31 E qui ont été cassés, ont donné le même travail de rupture, soit 24 kgm.

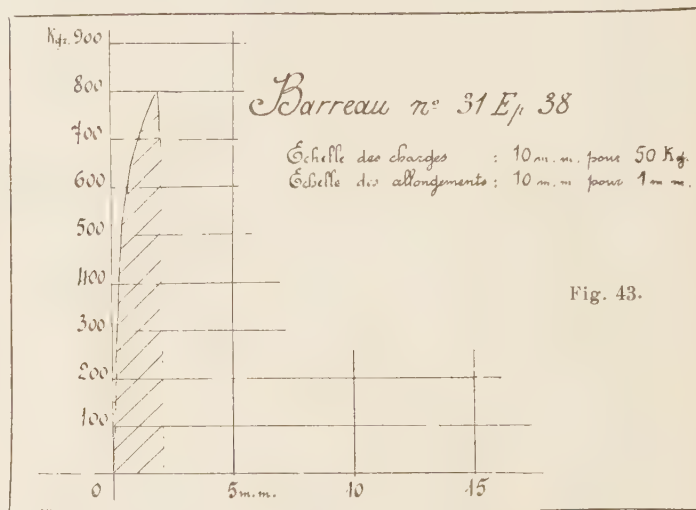


Fig. 43.

c) *Comparaison du choc et de l'action lente*. —

On constate que dans le cas du métal dur au chrome et au nickel recuit, les résultats de l'essai sur entaille sont sensiblement identiques (24 kgm. et 23,30 kgm.) que la sollicitation soit vive ou lente. C'est donc une nouvelles confirmation des conclusions auxquelles nous sommes arrivés précédemment.

2° BARREAUX DE 10 × 10 × 53,3. — a) *Action lente*. — Nous donnons ici (voir figure 43) le diagramme de l'essai par action lente du barreau 31 E_p 38, analogue au diagramme correspondant du barreau 31 E_p 33. Ces 2 barreaux ont donné comme travail de rupture, le premier, 1,26 kgm., le second 1,65 kgm., bien qu'ils aient été prélevés dans les deux fragments du même gros barreau n° 31 E 3. Nous reviendrons tout à l'heure sur ce point.

Quoiqu'il en soit, nous prendrons comme valeur du travail de rupture par action lente la moyenne des 2 nombres ci-dessus, soit 1,45 kgm.

L'examen du diagramme 31 E_p 38 nous conduirait exactement aux mêmes conclusions générales que l'examen du diagramme du gros barreau correspondant 31 E 2.

b) *Choc*. — La faible résilience du métal 31 à l'état E rendait peu intéressante la considération des déformations des barreaux en fonction des travaux absorbés (angles et travaux trop petits) : elle permettait, au contraire, d'étudier directement l'influence de la vitesse d'impact, celle-ci étant susceptible de varier dans des limites importantes, et, en particulier, de prendre des valeurs assez basses, tout en assurant, au moment du choc, une énergie disponible suffisante pour casser l'éprouvette. Nous avons pu ainsi faire varier la vitesse d'impact de 5,27 m. à 1,15 m. Le tableau XIX présente la suite des déterminations effectuées : les éprouvettes mises en œuvre sont prélevées, les 4 premières dans un des fragments du gros barreau 31 E 1, les 2 derniers groupes de 4 dans chacun des fragments du gros barreau 31 E 3 ; dans chacune de ces 3 séries, on a cassé une éprouvette à hauteur de chute maxima (vitesse de 5,27 m.) pour vérifier la comparabilité des essais.

Si l'on prend la moyenne des 3 déterminations effectuées à la vitesse maxima de 5,27 m., on trouve, pour définir la série, un travail de rupture de 1,35 kgm. $\pm$ 0,16. On constate, d'autre part, que les travaux correspondant aux vitesses successivement décroissantes envisagées, ou bien rentrent dans les limites que précise l'écart $\pm$ 0,16, ou bien s'en écartent extrêmement peu.

On peut donc affirmer, à nouveau, que l'influence de la vitesse d'impact, dans les limites usuelles, est négligeable.

Désignation des Barreaux	Remontée à vide	Vitesse d'impact	Remontée après rupture	Travail de rupture
	degrés	m.	degrés	kgm.
31 E _p 15 . . .	159° 2/10	5,27	148°	1,30
— 16 . . .	95°	3,94	89°	1,58
— 17 . . .	85°	3,01	79° 7/10	1,38
— 18 . . .	70°	3,07	63° 7/10	1,54
31 E _p 31 . . .	159° 2/10	5,27	146°	1,59
— 32 . . .	réserve pour vérifications éventuelles			
— 33 . . .	Essai par action lente			
— 34 . . .	58°	2,59	50° 7/10	1,58
31 E _p 35 . . .	159° 2/10	5,27	149°	1,16
— 36 . . .	49°	2,22	42°	1,33
— 37 . . .	25°	1,15	1° 5/10	1,44
— 38 . . .	Essai par action lente			

TABLEAU XIX

c) *Comparaison du choc et de l'action lente*. — Si nous prenons la moyenne des travaux de rupture absorbés par les barreaux 31 E_p 33, et 31 E_p 38, dans l'essai lent, nous trouvons 1,45 kgm., nombre qui rentre exactement dans les limites de définition de la série, soit $1,35 \pm 0,16$.

Ici, encore, la sollicitation vive et la sollicitation lente donnent des résultats équivalents.

d) *Comparaison de l'acier dur au chrome et au nickel et de l'acier mi-dur recuits*. — Nous avons annoncé, au commencement de ce chapitre, que les conclusions diverses mises en évidence par l'étude du métal 31 recuit (état E), étaient applicables aux autres aciers de la série précédemment examinée ; pour le montrer, nous allons considérer le cas de l'acier mi-dur. Cet acier mi-dur a été désigné jusqu'ici par la marque E II, quand il était traité ou recuit sous forme de carrés de 35 mm., capables de barreaux de 30 × 30 ; lorsqu'il est traité ou recuit sous forme de carrés de 15 × 15, ainsi que nous l'avons fait remarquer précédemment, nous le désignons par la marque 09 M. Mais le métal mis en œuvre est toujours le même, prélevé dans les mêmes conditions et dans le même lingot.

Ceci posé, voici un tableau permettant de com-

parer les travaux de rupture par action lente ou par choc, pour les métaux 31 ou E II ou 09 M, traités ou recuits.

Nature de la sollicitation	Travaux de rupture déterminés sur barreaux de 10 × 10 × 53,3			
	Acier 31		Acier demi dur	
	B ou C (traité)	E (recuit)	EII (traité)	09 M (recuit)
	kgm.	kgm.	kgm.	kgm.
Action lente	2,86	1,45	5,33	3,25
Choc . .	3,17	1,35	4,92	2,54

TABLEAU XX

Ce tableau montre que pour le chrome-nickel dur, comme pour le demi-dur, le recuit abaisse considérablement, et sensiblement dans les mêmes proportions, la valeur de la résilience. D'autre part, alors que pour l'acier 31 à l'état traité, le travail de rupture par action lente est inférieur au travail de rupture par choc et que, à l'état recuit, l'ordre de succession de ces deux travaux se trouve inversé, mais de façon peu sensible, pour le métal demi-dur, l'ordre étant déjà inversé à l'état traité, la différence, à l'état recuit, est plus accentuée. Toutefois, cette différence est assez peu marquée (27 %) pour qu'on puisse la considérer *pratiquement* comme inopérante, en ce sens qu'elle n'est pas susceptible de modifier le classement, les uns par rapport aux autres, des aciers de cette catégorie ; il ne faut pas oublier, en effet, que nous considérons ici des vitesses d'impact variant de 5 m. environ par seconde à quelques centimètres par minute.

3° CONCLUSIONS RELATIVES A L'INFLUENCE DE LA VITESSE D'IMPACT. — Les aciers recuits se comportent sensiblement comme les mêmes aciers traités pour emplois usuels en ce sens que l'influence de la vitesse, dans les limites très larges que nous considérons, peut être envisagée comme pratiquement négligeable. Ce point de vue est lé-

gitimé par la persistance de l'analogie entre les mécanismes de rupture des deux modes d'épreuve.

Toutefois, la sollicitation progressive tend à absorber, pour la rupture, un travail plus important que la sollicitation vive ; pour l'acier mi-dur, en particulier, la différence est de 27 % en faveur de l'action lente. Autrement dit, les expressions numériques globales des deux phénomènes sont simplement inversées, mais sans modification importante de l'allure générale de ces phénomènes.

B) Influence du diamètre de l'entaille. —

Nous ne reprendrons pas ici toute la série des essais présentés dans le chapitre précédent, et nous nous bornerons à examiner les cas extrêmes des entailles de 1,3 mm. et de 4 mm. de diamètre. Les métaux demi-dur et dur au chrome et au nickel donnent, dans ces conditions, sur barreaux de 10 × 10 × 53,3, les résultats suivants :

Désignation des Métaux	Travaux de rupture sur		Rapport de ces travaux
	Entaille de d = 1,3 mm.	Entaille de d = 4 mm.	
	kgm.	kgm.	%
31 E (recuit) . .	1,86 ± 0,04	2,65 ± 0	70
09 M (recuit) . .	2,54 ± 0,09	3,51 ± 0,10	72

TABLEAU XXI

On constate que pour ces 2 aciers, les résiliences sur entaille de 4 mm. sont supérieures aux résiliences sur entaille de 1,3 mm. Cette différence, qui est ici de 30 % environ pour le demi-dur comme pour le chrome-nickel dur, est assez appréciable, supérieure de 10 à 12 % à celle que nous avons trouvée pour les mêmes métaux trempés et revenus ; néanmoins, elle n'intervient pas pour modifier le classement des métaux les uns par rapport aux autres, et on peut admettre que l'augmentation du diamètre de l'entaille, dans

les cas considérés jusqu'ici, n'est pas susceptible de masquer une fragilité que révélerait une entaille de plus petit rayon.

La photographie de la figure 44 montre la différence d'aspect des cassures de deux des barreaux de chrome nickel dur, figurant au tableau ci-dessus, entaillés l'un (n° 31 E_p 13) au diamètre de 4 mm., l'autre (n° 31 E_p 14), au diamètre de 1,3 mm. ; la résilience la plus élevée (31 E_p 13) se manifeste par une légère striction et par une ligne de nerf en bordure de la cassure,

fèrent que de 20 % et les aspects des sections de rupture sont plus voisins l'un de l'autre que dans le cas précédent.

L'examen, à l'état recuit, des métaux considérés jusqu'ici à l'état trempé et revenu, ne modifie donc pas les conclusions auxquelles nous sommes arrivés antérieurement. L'influence du diamètre de l'entaille est nette ; mais étant donné qu'elle n'introduit aucun trouble dans le classement des métaux, qu'elle ne se manifeste que par une variation régulière des résiliences de

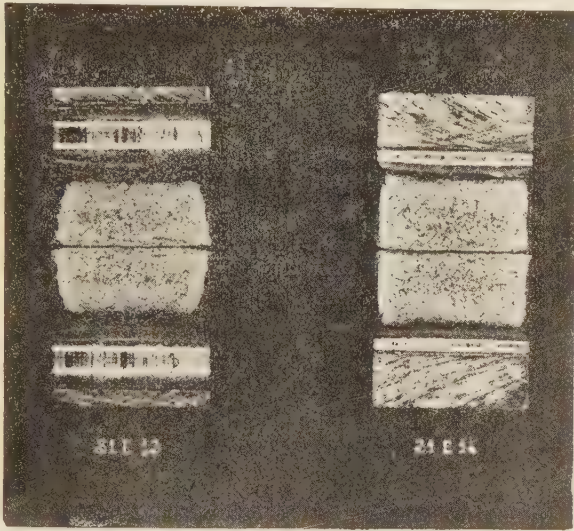


Fig. 44. — Cassures de deux barreaux de métal chrome nickel dur recuit, entaillés l'un (31 E_p 13) au diamètre de 4 mm., l'autre (31 E_p 14) au diamètre de 1,3 mm. On remarque, sur la section de l'éprouvette de gauche, une légère striction et une ligne de nerf en bordure de la cassure.

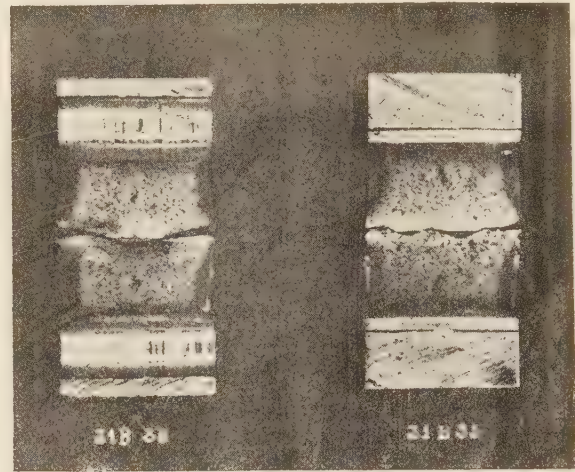


Fig. 45. Cassures de deux barreaux de métal chrome nickel dur trempé et revenu, entaillés l'un 31 B_p 38, au diamètre de 4 mm., l'autre (31 B_p 35) au diamètre de 1,3 mm. Les aspects de ces deux cassures sont très voisins l'un de l'autre.

striction et nerf qui n'apparaissent pas sur la section du barreau 31 E_p 14.

Pour permettre la comparaison, nous rapprochons de la précédente, la photographie de la figure 45 qui représente la cassure de 2 éprouvettes du même acier, mais à l'état trempé et revenu (tableau XIII de la page 41). L'éprouvette n° 31 B_p 38 est entaillée au diamètre de 4 mm., l'éprouvette n° 31 B_p 35 au diamètre de 1,3 mm. D'après ce que nous avons vu antérieurement, les résiliences de ces 2 barrettes ne dif-

ferent que de 20 %, il n'y a aucune raison jusqu'ici, pour fixer, à priori, entre 1,3 mm. et 4 mm., un diamètre plutôt qu'un autre.

C) Loi de similitude. — La question de la loi de similitude prend, dans le cas des aciers recuits, un intérêt particulier ; le recuit paraît, en effet, en première analyse, devoir conférer à la matière une structure parfaitement homogène, et éliminer la possibilité de formation de ces états hétérogènes, mal définis, auxquels la trempe est

susceptible de donner naissance à l'intérieur d'une masse un peu importante de métal. Le chrome-nickel, dont on connaît la propriété de se laisser pénétrer plus intimement que tout autre acier par le traitement, et dont la régularité est très satisfaisante, semblait tout désigné, dans ces conditions, comme matériel d'essai ; c'est donc à cet alliage que nous nous sommes adressé et voici le résumé des déterminations effectuées.

Deux gros barreaux 31 E 1 et 31 E 3 ont été cassés sur le mouton-pendule de 300 kg. ; dans les 4 fragments ainsi obtenus, on a débité, suivant les errements habituels, 16 éprouvettes de $10 \times 10 \times 53,3$. Le tableau XIX de la page 47 donne les travaux de rupture des 12 dernières barrettes de la série ; voici les résultats au choc des 4 premières, et, d'abord, ceux des barreaux de 30×30 .

Désignation des barreaux	Type du barreau	Mouton de 300 kgm.		Mouton de 30 kgm.	
		Travail de rupture	Moyenne	Travail de rupture	Moyenne
	mm.	kgm.	kgm.	kgm.	kgm.
31 E 1.	$30 \times 30 \times 160$	24 00	24 00 ± 0,00	"	"
31 E 3.	—	24 00		"	"
31 E _p 11.	$10 \times 10 \times 53,3$	"	"	1,8	"
31 E _p 12.	—	"	"	(essai sur entaille de $d = 4$ m/m.)	1,86 ± 0,04
31 E _p 13.	—	"	"		
31 E _p 14.	—	"	"	1 90	"

TABLEAU XXII

La comparaison des 2 tableaux fait ressortir pour les éprouvettes 31 E_p 11 et 31 E_p 14 un

travail de rupture (moyenne 1,86 kgm.) notablement supérieur à celui de l'éprouvette 31 E_p 15 (1,30 kgm.), cassée dans les mêmes conditions et prélevées dans le second fragment du même barreau de 30×30 ; notablement supérieur aussi à celui des éprouvettes 31 E_p 31 et 31 E_p 35 (moyenne 1,37 kgm.), cassées dans les mêmes conditions et prélevées dans les fragments du barreau 31 E 3. Malgré toutes les précautions prises au cours du recuit, la résilience décèle donc la non-identité de la matière dans la longueur d'un barreau de 160 mm. Et, cependant, les empreintes, faites à la bille de 5 mm., sous une pression de 1.000 kg., au milieu de chacun des fragments des barrettes 31 E_p 11 et 31 E_p 15, présentaient des diamètres très voisins, soit :

pour les 2 fragments 31 E_p 11, $d = 2,23$ et $2,23$ (dureté de 243).

— 31 E_p 15, $d = 2,23$ et $2,22$ (dureté de 243 et 245).

et — 31 E_p 31, $d = 2,23$ et $2,23$ (dureté de 243).

Cette première observation faite, on constate que le nombre 24 kgm. (travail de rupture des 2 barreaux de 30×30) est égal à 12,9 fois le nombre 1,86 kgm. (cas le plus favorable ; moyenne des travaux de rupture des 2 barreaux 31 E_p 11 et 31 E_p 14) et à 15,8 fois le nombre 1,51 kgm., moyenne des travaux de rupture des 11 éprouvettes 31 E_p cassées sur le mouton à différentes vitesses d'impact.

On voit donc que, si les valeurs de la résilience sur gros et petits barreaux se rapprochent l'une de l'autre en passant du métal traité au métal recuit, on est encore loin, dans ce dernier cas, de vérifier, même approximativement, la loi de similitude. Il semble normal en conséquence de conclure que cette loi n'est pas applicable aux essais de flexion sur entaille.

CHAPITRE III

**CAS EXCEPTIONNEL :
ACIER EXTRA-DOUX CRISTALLISÉ
A GROS GRAINS :**

Nous avons examiné jusqu'ici un assez grand nombre d'aciers, pris parmi ceux qu'on rencontre le plus fréquemment dans la pratique : nous croyons avoir mis en lumière que, pour ces types de métaux, lorsqu'ils se trouvent à leur état normal, c'est-à-dire à l'état traité, il n'est nécessaire

Ce cas exceptionnel, c'est le métal extra-doux qui le présente, lorsqu'il est amené par recuits prolongés à cristalliser en grains volumineux. Cet état est facilement réalisé dans les laboratoires ; mais il peut être accidentellement réalisé à l'atelier, surtout lorsque, à un écrouissage brutal, succède un séjour du matériel dans des conditions convenables de température.

C'est donc le métal extra-doux à gros grains (acier n° 55, état E ou H) que nous allons examiner dans ce chapitre. Nous l'étudierons comparativement avec un acier (n° 357) de même espèce, en ce sens qu'il est également à basse te-

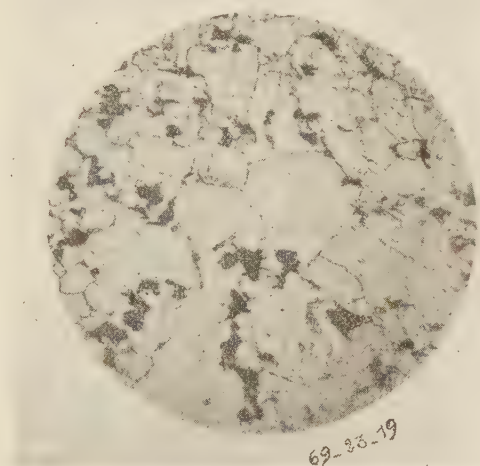


Fig. 46.
Texture de l'acier n° 55, traité pour cristallisation
à gros grains (Etat E ou H) - G = 150 d.

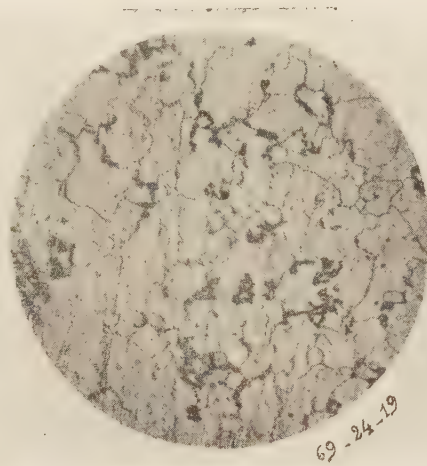


Fig. 47.
Texture de l'acier, n° 357, à 3 % de silicium
recuit - G = 150 d.

de faire intervenir dans la définition de l'essai de choc sur entaille, ni une limite inférieure à la vitesse d'impact, ni une limite inférieure au diamètre de l'entaille ronde ; mais, ces conclusions peuvent-elles être considérées comme étant d'une généralité absolue ?

Nous devons montrer maintenant qu'il n'en est rien ; nous avons, en effet, au cours de notre étude, rencontré une exception (il peut y en avoir d'autres) qui, tant en raison de son intérêt théorique que de son importance pratique, mérite d'être prise en sérieuse considération.

neur en carbone et manganèse, mais contenant 3 % de silicium. Nous rapprochons ces deux métaux, bien que l'ensemble de leurs propriétés soient très distinctes, parce qu'ils sont caractérisés tous deux par des résiliences basses, qu'ils sont indubitablement fragiles, quel que soit le sens précis qu'on attache à cette expression, et qu'ils présentent des structures à gros grains très voisines l'une de l'autre, comme les photographies des figures 46 et 47 ci-jointes le mettent en évidence. D'autre part, leur manière très différente de se comporter fera ressortir net-

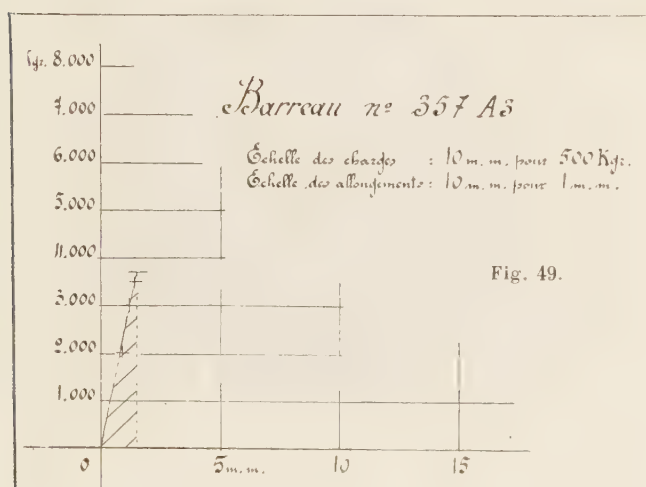
tement que ce n'est pas à l'état cristallisé que sont dus les phénomènes particuliers observés sur l'extra-doux, phénomènes que nous nous proposons de décrire maintenant.

A) Influence de la vitesse de l'essai. — 1° **BARREAUX DE 30 × 30 × 160.** — a) *Action lente.* — Les diagrammes de l'essai par action lente sont donnés par la figure 48 pour l'acier 55 E et par la figure 49 pour l'acier 357. On reconnaît, au premier coup d'œil, que l'on a affaire à des barreaux peu résilients, (comparer aux courbes 09 M, correspondant à un matériel revenu à des températures progressivement décroissantes), l'un (extra-doux), rompant presque immédiatement après le passage par le point

de tangence horizontale, l'autre (3 % de silicium) cassant avant son arrivée à ce point.

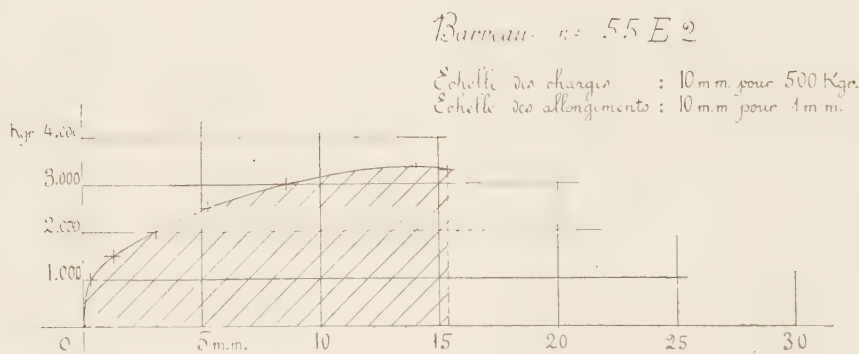
Pour l'alliage à 3 % de silicium, la branche de courbe existante se confond sensiblement avec une droite ; le phénomène de rupture ne présente donc plus les 3 périodes constitutives distinguées antérieurement : il se réduit purement et simplement à la période dite élastique ou à une portion de cette période. Il n'y a pas, en conséquence, à former le tableau des caractéristiques du diagramme et nous nous bornons à enregistrer que le travail absorbé par la rupture, en sollicitation lente, est de 2,35 kgm. seulement.

Pour l'acier 55 E, nous comparerons ses caractéristiques avec les caractéristiques correspondantes du même métal à l'état B (traité) ; c'est l'objet du tableau ci-dessous :

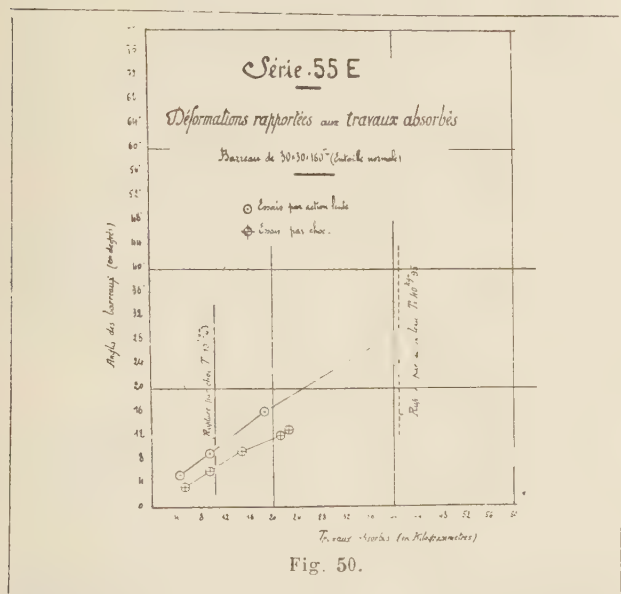


Désignation des Barreaux	Changement de direction		Tangente horizontale		Travail de rupture $\frac{T_4}{T_1}$	Rapport $\frac{T_4}{T_1} \times 100$
	Charge	Travail	Charge	Travail T_1		
55 B (texture fine)	kg	kgm.	kg.	kgm.	kgm.	%
	2.000	0.3	4.225	61.90	142,31	43
55 E (gros grains)	750	»	3.375	36,60	40.95	89

TABLEAU XXIII



Suivant une remarque très générale, ce tableau montre que les charges, correspondant au changement de direction et à la tangente horizontale, sont sensiblement proportionnelles aux limites d'élasticité (33,1 kg. et 17,4 kg.) et de rupture (45,5 kg. et 37,9 kg.) du métal sous les 2 états envisagés (voir tableau des caractéristiques mécaniques, page 18). Mais le travail absorbé au moment de l'imposition de la charge maxima est presque double et le travail de rupture presque quadruple, dans le cas de l'acier à l'état B, que dans le cas de l'acier à l'état E.



En outre, la fissilité de l'extra-doux à gros grains est très marquée ; si on se reporte aux suggestions que nous avons formulées plus haut (voir page 46), la simple considération du rapport $\frac{T_2 - T_1}{T_1} \times 100 = 11$, permet de considérer le matériel comme très fragile, bien que le travail de rupture (40,95 kgm.), soit relativement élevé. Mais c'est la comparaison du choc et de l'action lente qui va différencier nettement l'acier 55 à l'état E des autres métaux examinés jusqu'ici.

La courbe représentant les déformations du barreau en fonction des travaux absorbés, est donnée par la figure 50 ; nous l'examinerons ultérieurement.

b) *Choc*. — La résilience du métal à 3 % de silicium était trop faible pour que nous songions à déterminer les angles successifs pris par les barreaux en fonction des travaux absorbés ; nous nous sommes donc préoccupé uniquement d'obtenir les valeurs du travail de rupture aux diverses vitesses d'impact. Voici les résultats de 2 séries différentes, A et B (les essais par action lente ont été faits sur barreaux de la série A).

Désignation des Métaux	Vitesse d'impact	Série A		Série B	
		Nombre de barreaux essayés	Travail de rupture moyen	Nombre de barreaux essayés	Travail de rupture moyen
Métal 357	m		kgm		kgm.
	8,82	5	4,21 ± 0,32	3	3,71 ± 0,30
	7,14	»	»	2	3,29 ± 0,68
	6,63	2	1,74 ± 0,00	2	1,74 ± 0,00
	6,08	»	»	2	2,12 ± 0,00
	4,36	2	2,47 ± 0,00	»	»
	4,15	»	»	1	3,58
	3,07	»	»	1	1,25
	2,33	2	1,75 ± 0	»	»
	1,94	»	»	1	0,95
	1,17	2	1,28 ± 0,01	»	»
	0,78	1	1,21	»	»
	0,54	1	1,16	»	»

TABLEAU XXIV

Ce tableau fait ressortir que la résilience diminue, et même assez notablement, avec la vitesse d'impact ; mais les nombres obtenus sont vraiment trop bas pour qu'on puisse s'attacher aux valeurs numériques elles-mêmes, et nous nous bornons à envisager le sens du phénomène. Comme, d'autre part, les travaux de rupture par action lente (2,35 kgm.) et par choc à grande vitesse (4,21 kgm. ou 3,71 kgm., suivant les séries) sont assez voisins l'un de l'autre, nous admettons que le phénomène se réduit, dans les deux modes de sollicitation, à la période initiale définie antérieurement, période dite élastique.

Passons maintenant au cas de l'extra-doux à l'état E. Nous avons fait, sur ce métal, un grand nombre d'essais, pour acquérir toute sécurité sur

l'exactitude de nos résultats ; mais nous ne signalons, ici, que 2 séries de déterminations, l'une 55 E, ayant pour but de fixer la courbe des déformations rapportées au travaux absorbés (voir figure 50), l'autre, 55 E E E destinée à préciser l'ordre de grandeur de la variation du travail de rupture avec la vitesse d'impact.

Voici les résultats de la série 55 E (12 barreaux, dont 1 réservé à l'essai par action lente) :

Désignation des barreaux	Remontée du pendule à vide	Nombre de barreaux essayés	Vitesse d'impact	État du barreau après le choc	Angle du barreau	Travail absorbé moyen
	degrés		m		degrés	kgm
Série 55 E	157°20'	2	8,82	rompu	10,43	10,43 ± 0,00
	10	1	0,78	non-rompu	2	2,41
	15	1	1,17	—	3°40'	5,41
	20	1	1,55	—	6	9,57
	25	1	1,4	—	9°10'	14,88
	30	1	2,33	—	12	21,28
	31	1	2,40	—	13	22,68
	32	2	2,48	rompu	»	16,53 ± 2,11
	35	1	2,70	—	»	23,23

TABLEAU XXV

Ce tableau fait ressortir que le travail de rupture moyen de la série, pour une vitesse d'impact de 8,82 m. est de $10,43 \pm 0,00$ kgm. Dans ces conditions, par analogie avec les résultats antérieurs, on devait penser que les barreaux se casseraient, à vitesse réduite, à partir d'un angle de chute de 20°, par exemple, auquel correspond une énergie disponible de 9,57 kgm. Il n'en est rien : on peut laisser tomber la masse frappante successivement de 20, 25, 30 et même 31°, sans que les éprouvettes se rompent ; à ce moment, le travail absorbé est de 22,68 kgm., soit plus du double du travail absorbé sous une vitesse d'impact de 8,82 m.

Nous sommes donc, ici, en présence du cas exceptionnel signalé au début de ce chapitre : alors que, pour les autres métaux, traités pour emplois usuels ou recuits, la résilience varie de 10 à 20 % dans un sens ou l'autre, lorsque la

vitesse d'impact passe de 9 m. par seconde à 60 mm. à l'heure (rapport de 10⁵ à 1), ici la résilience double lorsqu'on passe de la vitesse de 9 m., à la vitesse de 2,70 m. par seconde (rapport de 3,3 à 1). Ce résultat est confirmé et précisé par les déterminations de la série 55 E E E, qui comprennent 6 barreaux, dont 3 cassés à la hauteur de chute maxima, et 3 essayés à la vitesse réduite de 2,70 m. par seconde.

Désignation des barreaux	Remontée du pendule à vide	Nombre de barreaux essayés	Vitesse d'impact	État du barreau après le choc	Travail absorbé moyen
			m.		kgm.
Série 55 EEE	157°20'	3	8,82	rompus	11,21 ± 0,51
	»	»	»	non rompu	28,72
	35°	3	2,70	rompu	18,02
	»	»	»	rompu	23,23

TABLEAU XXVI

Le travail de rupture moyen de la série à hauteur de chute maxima est ici un peu supérieur à celui de la série 55 E (11,21 kgm. au lieu de 10,43 kg.), mais le phénomène observé reste identiquement le même. Sur les 3 barreaux essayés à la vitesse de 2,70 m., l'un n'a pas cassé, tout en absorbant ainsi plus de 28 kgm. ; les 2 autres se sont rompus en absorbant, en moyenne, 20,62 kgm.

Il ne faut pas s'étonner des irrégularités qui se manifestent dans l'emploi des vitesses très réduites, correspondant à la mise en jeu de l'énergie juste nécessaire à la rupture de l'éprouvette. Il est bien évident, en effet, que la façon dont se produisent les réactions de la machine n'est pas la même, que la masse frappante franchisse la position d'impact, ou qu'elle y soit brutalement immobilisée. Il se peut également, d'autre part, que le barreau ne soit pas toujours placé, sur ses appuis, rigoureusement dans sa position normale : le processus de la rupture se

trouve, de ce fait, légèrement modifié, et cette modification marque sur le résultat d'une façon appréciable.

En tout état de cause, nous pouvons conclure avec certitude que la vitesse d'impact agit considérablement sur la valeur de la résilience du métal extra-doux à structure granulaire volumineuse, et que le phénomène observé dans ce cas est en sens inverse de celui que présentent l'ensemble des métaux traités pour emplois usuels que nous avons examinés jusqu'ici.

c) *Comparaison de l'action lente et du choc.* —

Pour mettre en pleine lumière le cas exceptionnel présenté par l'extra-doux à l'état E, nous comparerons les résultats qu'il donne à l'action lente et au choc, successivement avec les résultats fournis, dans les mêmes conditions, par le même extra-doux à l'état B, puis par le chrome-nickel dur aux états traité et recuit, enfin par le métal à 3 % de silicium.

Désignation des métaux	Travail de rupture		Rapports $\frac{T_l}{T_c} \times 100$
	par action lente T_l	par choc T_c	
	kgm.	kgm.	%
55 E (gros grains) . .	40,95	10,43	392
55 B (texture fine) . .	142,31	186,18	76
31 E (recuit)	23,30	24,00	97
31 B (traité)	44,35	52,88	83
357 (Si = 3 o/o) . . .	2,35	4,21	55

TABLEAU XXVII

Ce tableau fait voir que l'alliage au silicium suit la loi commune, tout en présentant une différence plus considérable que les métaux usuels (55 B ou 31 B) entre les résultats au choc et les résultats par action progressive : il montre, d'autre part, que pour l'extra-doux à gros grains, la sollicitation lente exige, pour arriver à la ruptu-

re, un travail quatre fois plus grand que la sollicitation vive ; cette observation confirme donc le résultat annoncé comme suite à l'étude de l'influence de la vitesse d'impact sur la résilience, et l'étend aux vitesses d'essai de l'ordre de 50 à 60 mm. par heure. Mais le point le plus intéressant que ce tableau mette en évidence est la modification introduite dans le classement des métaux, les uns par rapport aux autres, par la variation du mode de sollicitation adopté ; à l'action lente, en effet, l'extra-doux à gros grains se trouve dans le voisinage immédiat du chrome-nickel dur 31 B, trempé et revenu, et se place très au-dessus du chrome-nickel dur 31 E recuit ; tandis que, au choc, l'extra-doux à gros grains présente une résilience qui n'est que le cinquième de celle de l'acier 31 à l'état B et à peine la moitié de celle de l'acier 31 à l'état E. Il y a donc là un renversement dans la classification qu'il est important de retenir et qui fait ressortir la nécessité de produire la rupture des barreaux entaillés par choc et non pas progressivement.

On peut matérialiser les différentes déterminations effectuées par la construction du diagramme des déformations rapportées aux travaux absorbés (voir figure 50). Nous n'insistons pas sur l'examen des deux courbes qui y figurent, examen au cours duquel nous ne pourrions que répéter les observations faites ci-dessus. Nous signalerons seulement que la pente des portions rectilignes initiales, correspondant à la vitesse de déformation du barreau ne sont pas très différentes, par action lente et par choc, soit 76 % dans le premier cas et 62 % dans le second.

L'étude des métaux traités pour emplois usuels nous a amené à conclure à l'identité du mécanisme de la rupture, que celle-ci se produise brutalement ou progressivement. L'examen du diagramme de la figure 50 montre qu'il n'en est pas de même pour l'acier extra-doux à l'état E et les photographies des figures nos 51 et 52 illustrent ce fait de façon saisissante.

La première représente, vues de face, les sections de rupture, grossies deux fois, des 3 barreaux 55 E 1 (rompu à la vitesse de 8,82 m.),

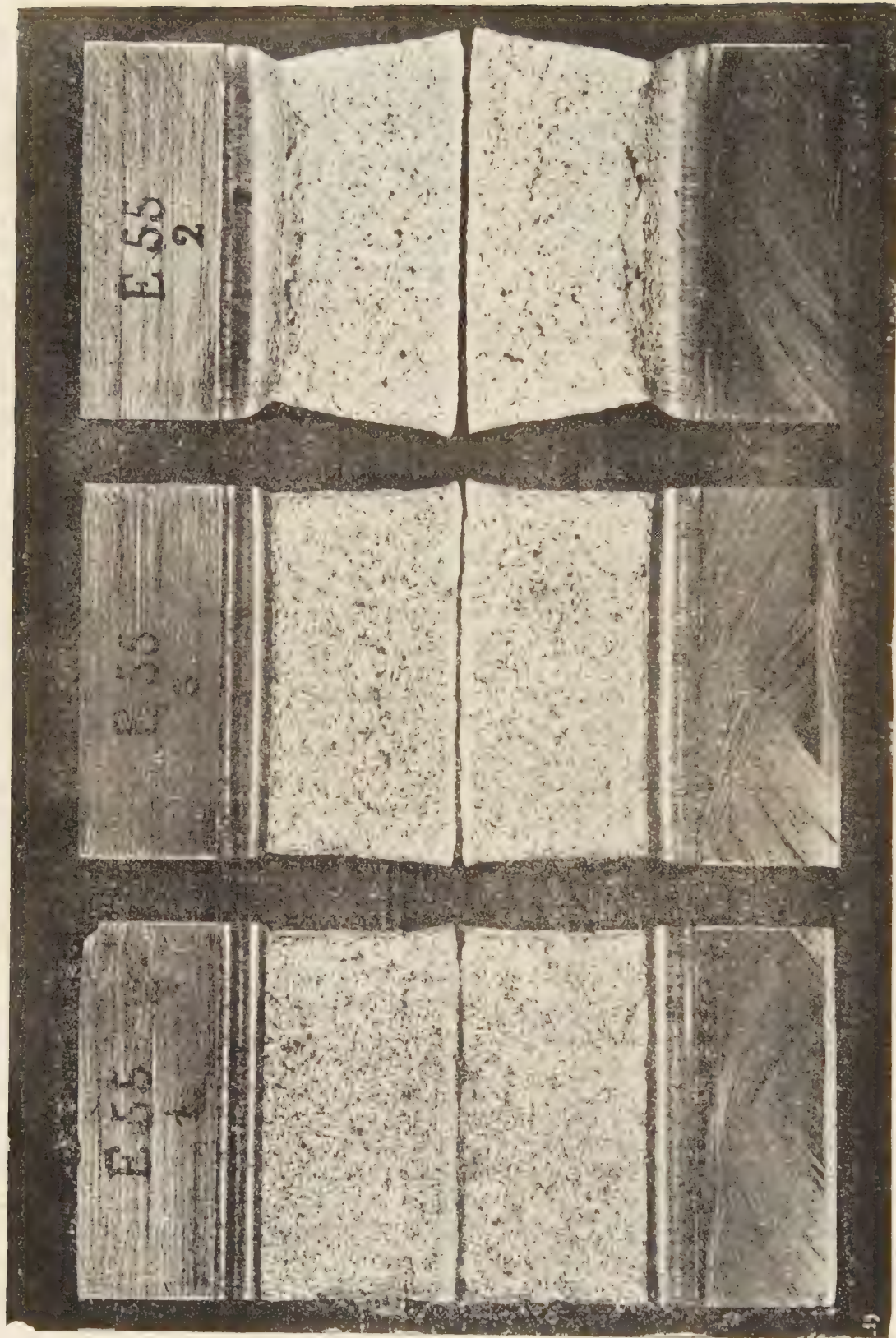


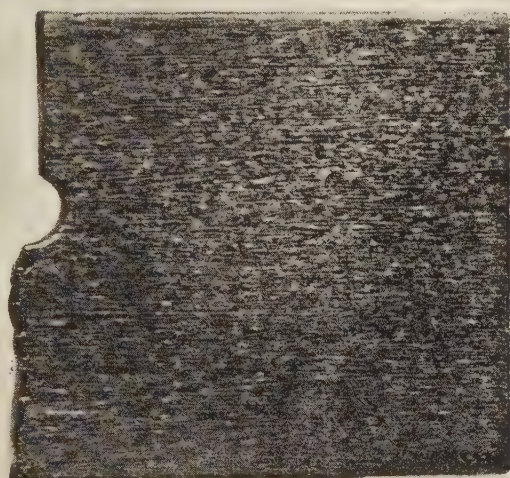
Fig. 51. — Section de rupture ($G=2$) des barreaux 55 E 1 (rompu à la vitesse de 8,82 m/s, 55 E 3 (rompu à la vitesse de 2,48 m/s) et 55 E 2 (rompu par action lente).

La section 55 E 1 ne présente pas de déformations appréciables : la section 55 E 2 est fortement strictionnée, le fond de l'entaille laisse apparaître de profondes gerçures : la section 55 E 3 offre un aspect intermédiaire.

55 E 3 (rompu à la vitesse de 2,48 m.) et 55 E 2 (rompu par action lente). On constate que la section du barreau 55 E 1 a presque le profil d'un barreau analogue découpé à la scie ; le fond de l'entaille est resté poli et brillant et les extrémités n'en sont que très légèrement déformées. Pour le barreau 55 E 2, au contraire, la section est très fortement strictionnée, réduite à 28 mm. environ le long de l'entaille et évasée à près de 33 mm., sur la face opposée : le fond de l'entaille, en outre, laisse apparaître de profondes gerçures. Le barreau 55 E 3 offre un aspect intermédiaire, mais se rapprochant de l'aspect de l'éprouvette 55 E 1.

goureusement rectilignes, au voisinage de la cassure, alors que les fibres du barreau rompu lentement (55 E 2 ; à droite de la figure) ont subi un changement d'orientation très appréciable, dans la région correspondante. Le profil de la déformation subie par le fond de l'entaille distingue également très bien, sur cette épreuve, les deux modes de sollicitations employés.

Ces observations permettent de conclure que l'acier extra-doux à gros grains présente deux modes de rupture totalement différents : par action lente, la rupture se produit suivant le mécanisme admis pour les métaux traités ou recuits, c'est-à-dire que le phénomène présente 3 périodes



69.16.12

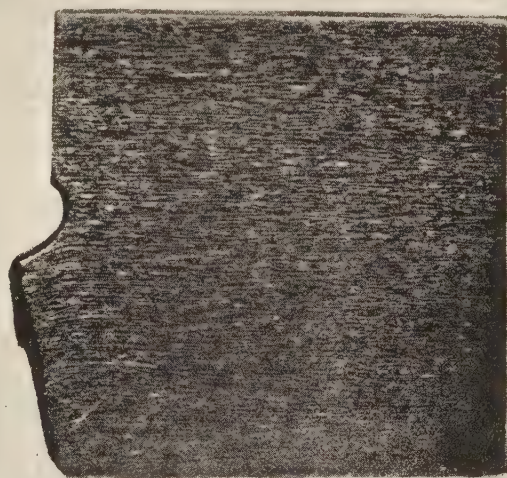


Fig. 52. — Section longitudinale (attaque Stead, $G=2$) dans le voisinage de l'entaille ; à gauche, du barreau 55 E 1, rompu à la vitesse de 8,82 m ; à droite, du barreau 55 E 2, rompu par action lente.

Les fibres du métal n'ont subi aucune déformation au cours de l'essai par choc : elles ont subi, au contraire, un changement appréciable d'orientation, dans la région où s'appuie le couteau, au cours de la sollicitation lente.

La photographie de la figure 52 représente une portion de la section longitudinale, dans le voisinage de l'entaille, des fragments 55 E 1 et 55 E 2 (grossissement 2) : cette section a été polie et attaquée au réactif de Stead. On remarque que les fibres du barreau rompu à grande vitesse (55 E 1 ; à gauche de la figure) sont restées ri-

successives, période élastique, période des déformations permanentes et période de fissilité, cette dernière étant très restreinte par rapport aux deux autres. Par choc, au contraire, la rupture se produirait vraisemblablement suivant un mécanisme analogue à celui que l'étude de l'alliage à 3 % de silicium a mis en évidence, c'est-à-dire

que le phénomène se réduirait à la période élastique et à une petite portion de la période suivante.

On est tenté, pour expliquer ces phénomènes, de recourir à l'hypothèse, formulée par M. Stead et développée par M. Henry Le Chatelier (1), des cassures inter et intracristallines.

Nous avons cherché, mais sans y réussir nettement, à contrôler ce point de vue par l'observation directe ; les déformations sont trop intenses dès qu'il y a choc, et les dénivellations produites dans les surfaces polies trop profondes, pour qu'on puisse saisir, sur ces métaux, la transition entre les deux modes de rupture. La vérification, par voie détournée, de l'hypothèse, nécessiterait un nombre considérable d'essais, que nous nous proposons d'entreprendre dans la suite, mais qui ne sauraient rentrer dans le cadre de ce travail. Nous nous bornons donc à enregistrer les faits, à les rapprocher d'une hypothèse séduisante, due à de savants métallurgistes, mais sans pouvoir, pour le moment, légitimer avec précision l'accord entre la théorie et l'expérience.

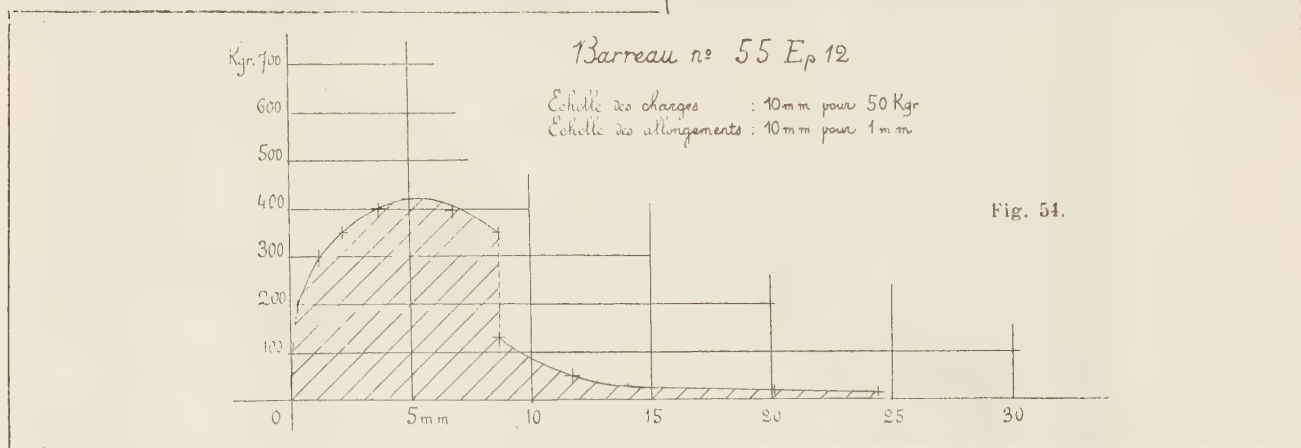
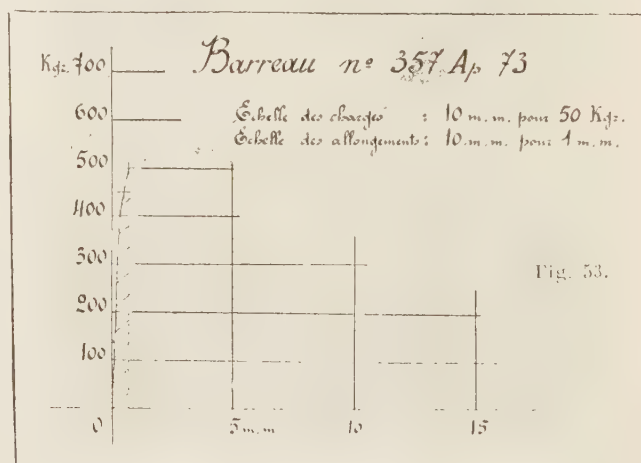
2° BARREAUX DE $10 \times 10 \times 53,3$. — a) *Action lente*. — Les diagrammes représentatifs de l'essai par action lente (figures 53 et 54) conduisent, pour l'alliage à 3 % de silicium (barreau 357 A_p 73) et pour le métal extra-doux à gros grains (barreau 55 E_p 12) à des conclusions identiques

(1) Henry Le Chatelier, *Bulletin de l'Association internationale pour l'essai des matériaux*, Congrès de Budapest, septembre 1901.

à celles que les barreaux de 30×30 ont mises en évidence. Le travail absorbé pour la rupture des éprouvettes 357 est si petit (0,2 kgm. environ) que nous n'insisterons pas sur cet alliage et nous nous bornerons à indiquer que le travail de rupture par sollicitation progressive est, pour le métal 55 E, de 3,71 kgm.

b) *Choc*. — Mêmes remarques que ci-dessus dans le cas du choc.

La rupture d'un barreau 55 E_p absorbe un travail de 1,06 kgm., environ, pour une vitesse d'impact de 5,27 m. (hauteur de chute maxima) et un travail de 2,17 kgm. environ, pour une vitesse d'impact de 1,56 m. ; les résultats d'ensemble sont donc les mêmes que ceux obtenus précédemment.



c) Comparaison de l'action lente et du choc. —

Les observations que nous avons été amené à formuler dans le cas des gros barreaux se retrouvent exactement ici ; le tableau ci-dessous met en évidence, par exemple, la différence du classement de l'extra-doux à gros grains, par rapport aux autres métaux, suivant que l'épreuve est exécutée brusquement ou lentement.

Désignation des Métaux	Travaux de rupture		Rapports $\frac{T_l}{T_c} \times 100$
	par action lente T_l	par choc T_c	
	kgm.	kgm.	%
55 E (gros grains) extra doux	3,71	1,06	350
55 B (texture fine) extra-doux	6,98	8,54	81
31 E (recuit) chrome nickel dur	1,45	1,35	107
31 B (traité) chrome nickel dur	2,86	3,17	90
09 M (recuit) demi dur	3,25	2,54	127

TABLEAU XXVIII

D'autre part, le diagramme donnant les déformations des barreaux en fonction des travaux absorbés pour le métal 55 E, est donné par la figure 55 ; il se présente exactement comme le diagramme correspondant relatif aux gros barreaux.

d) Conclusions relatives à l'influence de la vitesse d'impact. — L'étude des aciers traités pour emplois usuels, nous a amené à conclure que la vitesse d'impact avait, sur la résilience une influence pratiquement négligeable, en ce sens que cette vitesse pouvait être arbitrairement choisie entre des limites très différentes, dont l'une voisine de zéro, sans que le classement des métaux, les uns par rapport aux autres, soit modifié. On pouvait, dans ces conditions, envisager l'opportunité d'exécuter normalement l'essai de flexion sur entaille à l'aide de machines statiques (à traction ordinaire, par exemple), ce qui eût eu le

double avantage de réduire le nombre des types d'appareils en service dans les Laboratoires industriels, et de permettre l'examen des déformations successives du barreau en cours d'épreuve.

Mais l'existence d'une seule exception, surtout lorsqu'elle porte sur un acier de l'importance pratique de l'extra-doux, s'oppose formellement à l'adoption d'une pareille suggestion. Il

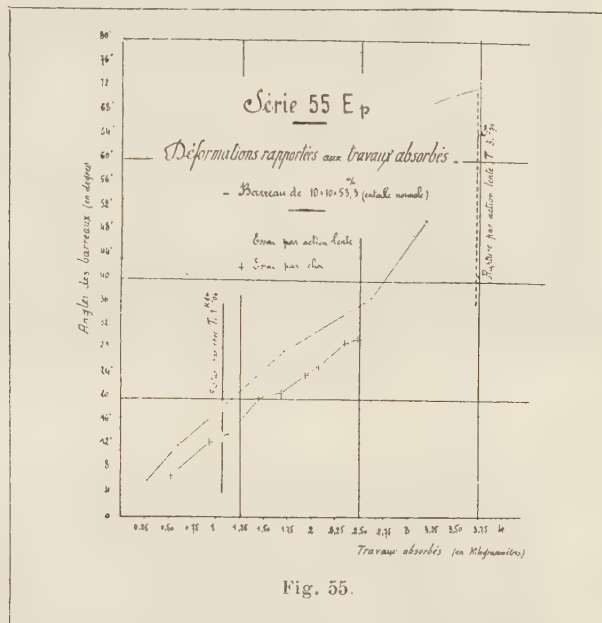


Fig. 55.

faut donc, de toute nécessité, conserver à l'essai de flexion sur entaille son caractère de sollicitation vive et maintenir les vitesses d'impact entre les limites que l'expérience courante et les facilités de construction ont consacrées (de 4 à 8 m.). Étant donné, en effet, que le travail de rupture ne fait que doubler (11,21 kgm. à 23,23 kgm. pour les gros barreaux, et 1,06 kgm. à 2,17 kgm. pour les petits) quand, pour un mouton de même masse, la vitesse passe des valeurs les plus élevées réalisées normalement (8,82 m. pour les gros barreaux et 5,27 m. pour les petits) aux valeurs les plus basses susceptibles de provoquer la rupture par choc, et que, d'autre part, cet accroissement de la résilience paraît ne se manifester qu'au voisinage de la vitesse critique (critique en ce sens que le barreau casse ou ne casse pas indifféremment ; soit 2,70 m. pour les gros-

ses éprouvettes et 1,56 m. pour les petites), il semble inutile d'imposer à la vitesse d'impact des limites plus étroites que celles que nous avons proposées ci-dessus.

En tout état de cause, nous sommes, maintenant, en mesure de répondre à la première partie de la question posée au début de ce travail ; pour mettre en évidence, en toute sécurité, la fragilité d'un barreau entaillé suivant un profil donné, il est indispensable de procéder par choc, et dans des conditions de vitesse déterminées.

B) Influence du diamètre de l'entaille. — Ici, encore, les essais ont été effectués sur barreaux de 10 × 10 seulement, pour éviter la mise en œuvre d'un poids de métal considérable.

Pour l'alliage à 3 % de silicium, qui n'a paru présenter aucune anomalie, nous n'avons étudié que les entailles de 1,3 mm. et de 4 mm. de diamètre ; pour le métal extra-doux à gros grains, au contraire, en raison de la nouvelle anomalie reconnue, nous avons réalisé des entailles de diamètres croissants, soit 1,3 mm., 2 mm., 3 mm., et 4 mm. Voici les résultats obtenus :

Diamètres de l'entaille	Travaux absorbés	
	Métal 357	Métal 55 E
mm.	kgm.	kgm.
1,3	0 18	0 83 ± 0 19
2	»	2.70 ± 0,88
3	»	4,64 ± 0,47
4	0,18	5 94 ± 0,40

TABLEAU XXIX

On constate que l'alliage 357 à 3 % de silicium est insensible à la variation du facteur considéré, dans les limites de précision compatibles avec une valeur absolue aussi basse de la résilience. La photographie de la figure 56 montre d'ailleurs

que rien, dans l'aspect des cassures, ne distingue l'éprouvette 357 A_p 12 (entaille de 4 mm. de diamètre) de l'éprouvette 357 A_p 157 (entaille de 1,3 mm. de diamètre).

Mais le métal 55 E se comporte encore ici d'une façon absolument exceptionnelle : pour cet acier, en effet, la valeur du travail de rupture passe de 0,83 kgm. à près de 6 kgm., quand le diamètre de l'entaille passe de 1,3 mm. à 4 mm., toutes autres choses restant égales ; soit une augmentation

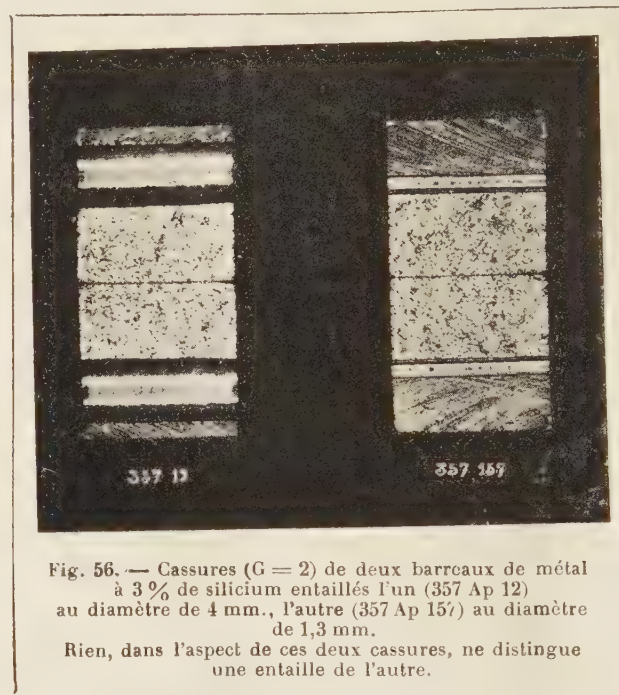


Fig. 56. — Cassures ($G = 2$) de deux barreaux de métal à 3 % de silicium entaillés l'un (357 A_p 12) au diamètre de 4 mm., l'autre (357 A_p 157) au diamètre de 1,3 mm.
Rien, dans l'aspect de ces deux cassures, ne distingue une entaille de l'autre.

de la résilience de plus de 700 pour 100, alors que dans le cas le plus favorable des métaux antérieurement étudiés (métal K : voir page 41) cette augmentation n'atteignait que 141 %.

Les photographies ci-jointes permettent de se rendre compte que les différences constatées entre les travaux absorbés par les éprouvettes de chacune de ces 4 séries se manifestent par des différences très nettes dans les mécanismes de rupture.

L'épreuve de la figure 57 donne, en vraie grandeur, le profil d'un des barreaux de chaque groupe, correspondant aux entailles de 1,3 mm., 2

mm., 3 mm. et 4 mm. de diamètre (de gauche à droite, dans cet ordre, sur la photographie). Avec l'entaille de 1,3 mm., on obtient une cassure sèche, comparable au sectionnement à la scie : avec les entailles de 2 et 3 mm., la section de rupture est déjà moins franche ; avec l'entaille de 4 mm.,

me grossie deux fois ; les silhouettes des échantillons sont ici tellement dissemblables, qu'on serait tenté de les rapporter à 4 types d'aciers distincts et aussi à des profondeurs d'entaillage très différentes. La cassure du barreau 55 E_p 31 ($d = 1,3$ mm.) est presque rigoureusement pla-

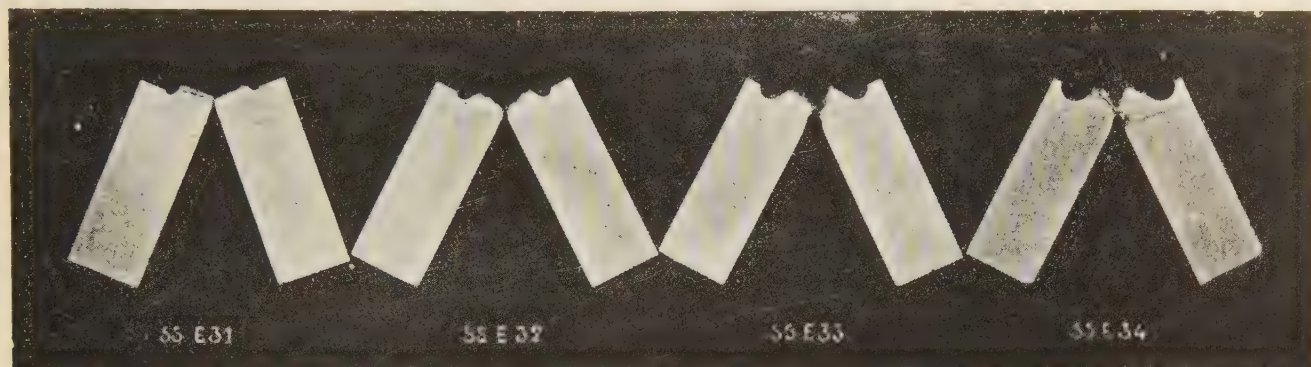
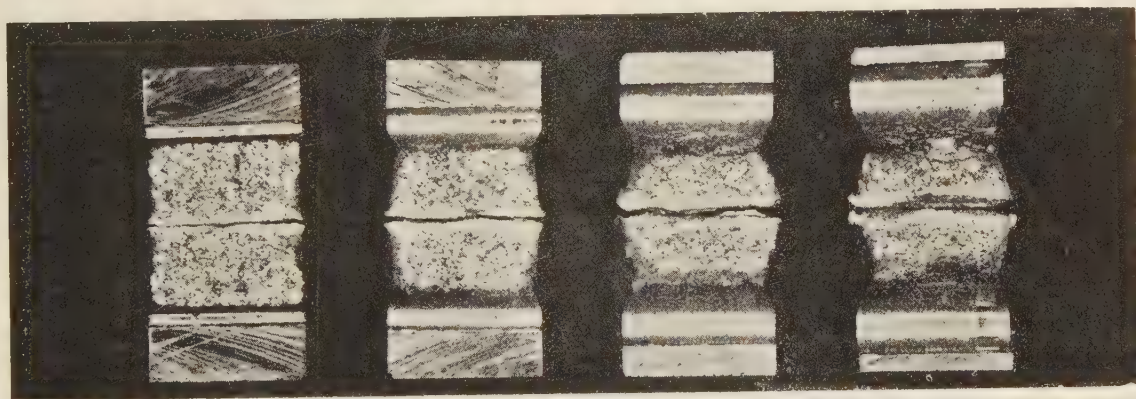


Fig. 57. — Profils, en vraie grandeur, de 4 barreaux du même métal extra-doux à gros grains, entaillés à mi-épaisseur les diamètres de l'entaille étant de : 1,3 mm. pour le barreau 55 E_p 31, 2 mm. pour le barreau 55 E_p 32, 3 mm. — 55 E_p 32 et 4 mm. — 55 E_p 34



Eig. 58. — Section de rupture ($G = 2$) des 4 barreaux ci dessus.
Les aspects présentés par ces sections sont très différents : on passe de la cassure sèche, sans allongement appréciable du fond de l'entaille (barreau 55 E_p 31 : $d = 1,3$ mm.) à la cassure très fortement strictionnée, avec allongement considérable au fond de l'entaille (barreau 55 E_p 34 : $d = 4$ mm.).

on se trouve en présence d'un aspect rappelant l'arrachement qui accompagne généralement la cassure à nerf, bien que la section de rupture de l'éprouvette considérée soit nettement cristalline.

La photographie de la figure 58 donne, pour les mêmes barreaux, la section de rupture elle-même ;

celle du barreau 55 E_p 34 est très fortement strictionnée : les 2 éprouvettes centrales offrent des aspects intermédiaires. Ajoutons que le barreau 55 E_p 34 n'était pas entièrement rompu après passage entre les appuis et qu'il a fallu exercer un effort appréciable pour en séparer les fragments.

ESSAIS AU CHOC SUR ENTAILLES

Toutes ces observations concordent à montrer que l'extra-doux à gros grains se comporte de deux façons absolument distinctes, tantôt comme un matériel très fragile, tantôt comme un matériel bien résilient suivant le mode d'entailage adopté. Pour exprimer numériquement cette conclusion, comparons les résultats du tableau précédent à ceux que nous ont donnés les métaux traités pour emplois usuels : on constate que :

pour une entaille de 1,3 mm. ou de 2 mm. de diamètre, l'extra-doux à gros grains se classe le dernier, loin derrière les autres métaux ;

pour une entaille de 3 mm. de diamètre, il se montre plus résilient que l'acier 31 (chrome-nickel dur) ;

enfin pour une entaille de 4 mm. de diamètre, il atteint le voisinage immédiat des aciers demi-durs E II et J IV.

Si l'on pousse les choses à l'extrême, et qu'on fasse des essais de flexion sans entaille, on reconnaît que le métal extra-doux à l'état E se comporte presque exactement comme le métal extra-doux à texture fine (état B). Pour le montrer nous avons prélevé 2 barrettes de $10 \times 5 \times 53,3$ dans le barreau 55 E 12 et 2 barrettes identiques dans le barreau 55 B 11. Ces 4 éprouvettes, essayées au mouton-pendule, à la vitesse d'impact maxima, ont passé par les appuis, les unes comme les autres, *sans casser*. D'autre part, le travail absorbé par la flexion a été de 6,01 kgm. pour les 2 barrettes 55 E et, respectivement, de 7,06 kgm. et 7,41 kgm. (moyenne 7,23 kgm.) pour chacune des barrettes 55 B : ces 2 nombres 7,23 et 6,01 sont exactement dans le rapport des limites de rupture du métal à l'état B (45,5 kg.) et à l'état E (37,9 kg.) ; autrement dit, l'épreuve de flexion ordinaire donne des renseignements correspondant à l'essai de traction, mais est impuissante à déceler la fragilité.

Cette dernière expérience est illustrée par les photographies des figures 59 et 60 (grossissement 2) ; on remarque que rien ne distingue les barrettes 55 E (ligne supérieure) des barrettes 55 B (ligne inférieure), si ce n'est que les pre-

mières présentent un certain gaufrage de la face opposée à l'impact, gaufrage dû aux déformations subies par les grains volumineux qui constituent le métal. Mais, à part cela, rien de différent ; même angle, même déformation, etc...

Pour mettre en évidence cette propriété de la matière, pratiquement capitale, qu'est la fragilité, il est donc indispensable de recourir à l'entailage, et, comme nous l'avons montré précédemment, à l'entailage dans des conditions de profil déterminées.

Il faut ajouter, également, dans des conditions de profondeur déterminées. Nous nous proposons de montrer, en effet, que la profondeur a, toutes autres choses restant égales, une influence sensible qu'il convient de ne pas négliger. Voici, par exemple, une série de 4 éprouvettes, prélevées dans un même fragment de barreau 55 H 4 (la série H est traitée exactement comme la série E, qu'elle contrôlait) ; pour les 4 barrettes, l'arrondi du fond de l'entaille est au diamètre de 1,3 mm., tandis que la profondeur d'entailage est de 5 mm. (mi-épaisseur), pour les 2 premières et de 2 mm. seulement pour les deux dernières. Le tableau suivant rend compte des essais au choc effectués sur ces barreaux.

Désignation des barreaux	Diamètre de l'entaille	Profondeur de l'entailage	Travaux de rupture	
			Élémentaires	Moyens
	mm.	mm.	kgm.	kgm.
55 H 41	1,3	5	1,67	1,59 ± 0,07
— 42	1,3	5	1,52	
55 H 43	1,3	2	1,67	2,38 ± 0,71
— 44	1,3	2	3,10	

TABLEAU XXX

On constate que des 2 entaillages étudiés, le moins profond (2 mm.) fait ressortir un travail de rupture moyen supérieur à l'autre (5 mm.) ; mais surtout, et c'est une observation importante

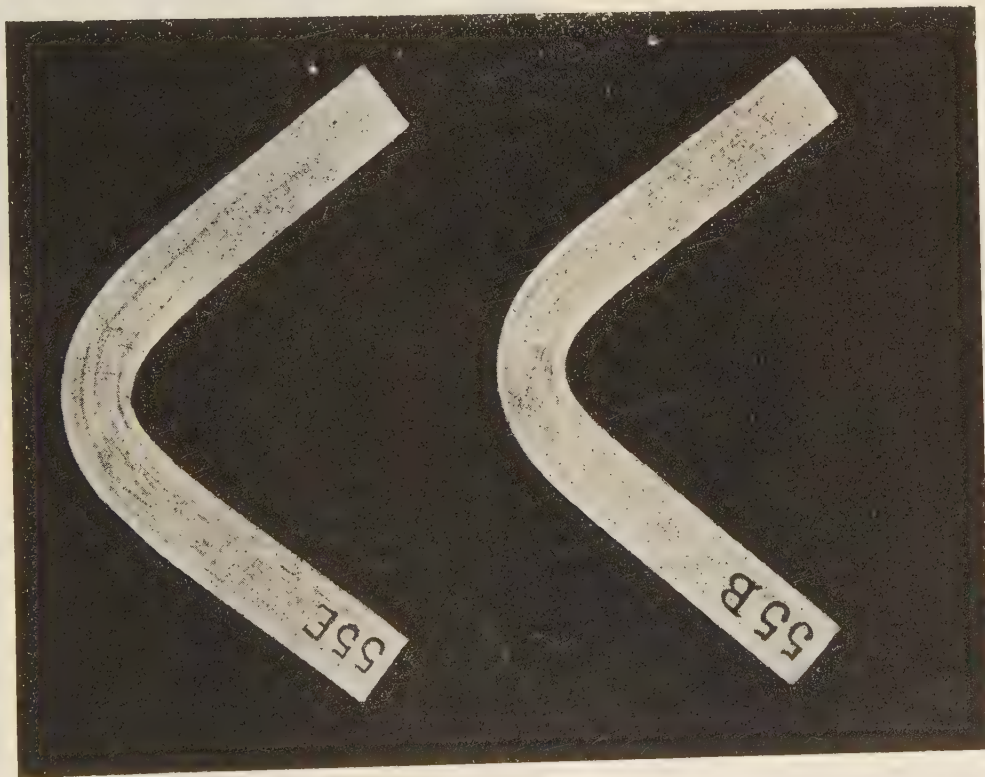


Fig. 59.

Deux barrettes de pliage G = en acier extra-doux n° 55, à l'état E pour la ligne supérieure, et à l'état B pour la ligne inférieure

Rien ne distingue ces éprouvettes les unes des autres, sauf un léger gaufrage de la face opposée à l'impact pour les 55 E. Et pourtant l'essai au choc sur entaille montre que le métal 55 est très résilient, à l'état B, (résilience de 17,8) et très fragile, au contraire, à l'état E (résilience de 2,12)

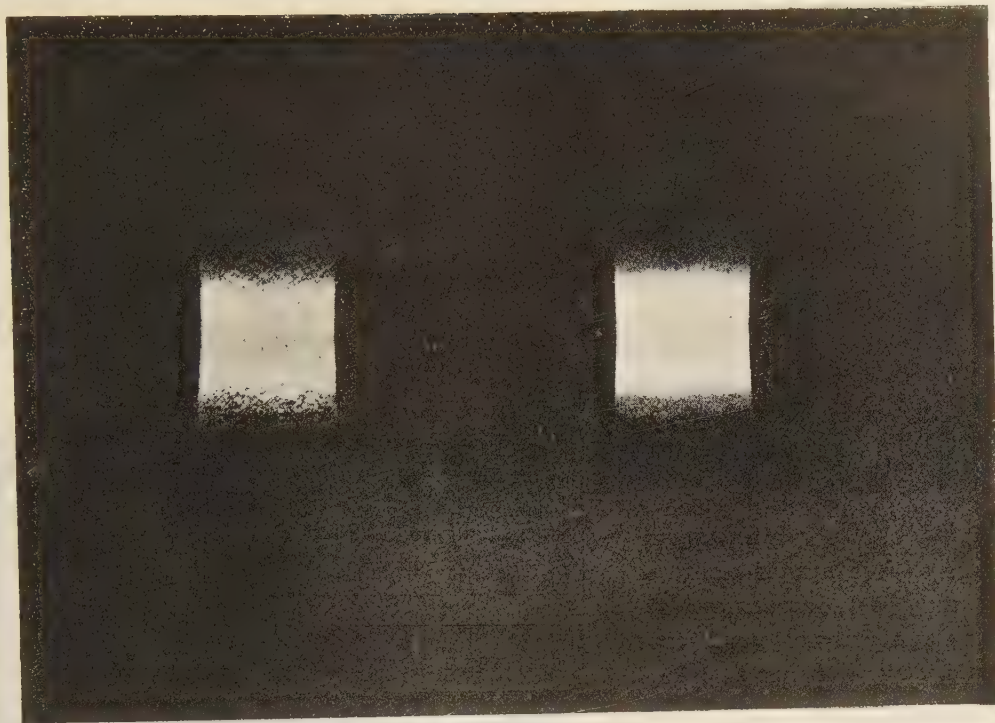


Fig. 60.

que nous avons faite très fréquemment, il donne, avec le métal que nous envisageons ici, des résultats incertains, tantôt bas et tantôt élevés, comme si, dans ces conditions, la cassure pouvait se produire indifféremment, suivant l'un ou l'autre des 2 mécanismes que nous avons signalés antérieurement.

Cette insécurité des résultats est mieux mise en évidence encore, lorsque le diamètre de l'entaille est plus grand ; c'est ce que montre la série suivante de 4 éprouvettes, prélevées dans le 2^e fragment du barreau 55 H 4, pour lesquelles le diamètre de l'entaille est de 2 mm. (au lieu de 1,3) avec la même variation de profondeur que ci-dessus.

Désignation des barreaux	Diamètre de l'entaille	Profondeur de l'entaillage	Travaux de rupture	
			élémentaires	moyens
	mm	mm.	kgm.	kgm.
55 H 45	2	5	2,23	2,27 ± 0,04
— 46	2	5	2,31	
55 H 47	2	2	8,62	5,72 ± 2,89
— 48	2	2	2,83	

TABLEAU XXXI

Le phénomène annoncé se manifeste ici avec plus d'intensité que dans l'expérience précédente ; l'entaillage à 2 mm. seulement de profondeur donne 2 résiliences (17,24 et 5,66), dont l'une est le triple de l'autre, alors que l'entaillage à 5 mm. (mi-épaisseur) donne 2 résiliences (4,46 et 4,62) pratiquement identiques. L'aspect des cassures des éprouvettes 55 H 47 et 55 H 48 (voir photographie de la figure 61) rend nettement compte de la différence des résiliences observées et fait ressortir que les ruptures des 2 barreaux se sont produites suivant 2 mécanis-

mes distincts, que nous avons, d'ailleurs, déjà rencontrés, dans l'étude de l'influence soit de la vitesse d'impact, soit du diamètre de l'entaille. Mais alors que nous étions maîtres, antérieurement de faire intervenir l'un ou l'autre de ces modes de rupture, par la variation d'un des éléments de l'épreuve, nous constatons, dans le cas présent, qu'ils se manifestent, l'un ou l'autre indifféremment, sans aucune modification apparente aux conditions de l'essai. C'est un état d'équilibre instable qu'il importe d'éviter avec le

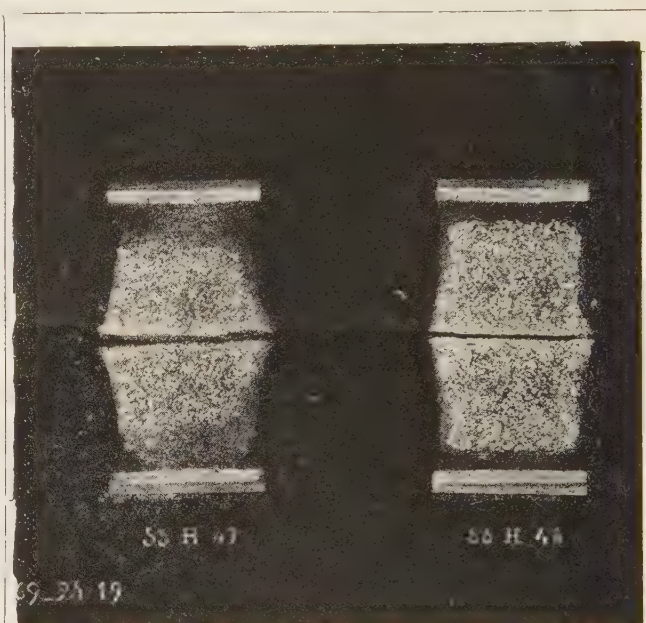


Fig. 61. — Deux barreaux du même acier extra-doux à gros grains, entaillés de la même façon ($d = 4$ mm), présentent des mécanismes de rupture très différents (et des résiliences également très différentes), le type d'entaille réalisé ne décelant pas la fragilité avec certitude.

plus grand soin dans la technique du laboratoire, et c'est pour cette raison qu'il convient, à notre avis, de proscrire rigoureusement les entailles peu profondes. Nous légitimons ainsi le choix que nous avons fait, au début de ce travail, de l'entaillage à mi-épaisseur (voir page 17).

Il nous semble opportun, pour terminer, de donner une idée des résultats que fournissent les divers modes d'entaillage usuels, dans le cas de

l'acier extra-doux à gros grains ; cette question sort quelque peu des limites de notre programme, mais elle fera l'objet de considérations qui seront utiles à l'établissement de nos conclusions.

Nous utilisons, comme ci-dessus, la barrette de $10 \times 10 \times 53,3$ et nous comparons entre elles :

l'entaille Charpy (ronde, $d=1,3$ mm., profondeur de 5 mm.) ;

l'entaille Mesnager (ronde, $d=2$ mm., profondeur de 2 mm.) ;

l'entaille Standard Izod (en V, angle de 45° , arrondi de 0,25 mm. de rayon, profondeur de 2 mm.) ;

le trait de scie (largeur de 1 mm., profondeur de 3 mm., pour se rapprocher du type Frémont).

Pour assurer la meilleure comparabilité possible de cette série, nous prélevons 8 éprouvettes dans les 2 fragments du barreau 55 A 5 (vérifié au choc, comme satisfaisant dans l'ensemble) et nous affectons une des 4 barrettes de chaque fragment à chaque type d'entaille ; nous obtenons ainsi, au choc, les résultats suivants :

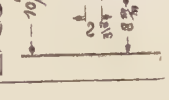
Types d'entailles		Désignation des barreaux	Travaux de rupture	
			individuels	moyens
Standard Izod		55 H 51	1,23	1,19 $\pm$ 0,01
		— 51	1,16	
Trait de scie type Frémont		55 H 52	6,10	1,00 $\pm$ 2,10
		— 56	1,90	
Charpy (type Copenhague)		55 H 53	1,23	1,23 $\pm$ 0,01
		— 57	1,2	
Mesnager		55 H 54	11,33	9,60 $\pm$ 1,70
		— 58	7,28	

TABLEAU XXXII

Ce tableau confirme ce que nous avons énoncé plus haut, à savoir que l'entaille ronde peu profonde (barreaux 55 H 54 et 58) est susceptible de donner des résultats irréguliers et de faire apparaître une résilience satisfaisante (19,20 kgm.), même quand le métal est nettement très fragile. Les deux mécanismes de rupture ne se sont pas manifestés ici comme dans l'expérience précédente ; les résiliences obtenues sont élevées, mais notablement différentes l'une de l'autre.

Nous retrouvons également, pour le trait de scie, une irrégularité qui est due au manque de profondeur de l'entaillage (3 mm.).

On constate enfin que l'entaille aigüe à 2 mm. seulement de profondeur et l'entaille ronde profonde donnent des résultats pratiquement identiques, sans aucune manifestation d'irrégularité. L'entaille aigüe est donc aussi sévère et aussi satisfaisante que celle de Copenhague ; notre choix ne s'est arrêté sur ce dernier type, pour l'exécution de nos essais, qu'en raison de la sécurité et de la facilité de sa réalisation.

Les différentes expériences que nous venons de présenter nous permettent, semble-t-il, de formuler des conclusions précises relatives à l'influence de l'entaillage sur les résultats de l'essai de flexion par choc ; nous croyons avoir montré, en effet, que, si l'on veut déceler, avec certitude, la fragilité d'un métal, il est indispensable, indépendamment de la question de vitesse, d'une part, de mettre en œuvre des barreaux entaillés, et, d'autre part, de pratiquer l'entaillage dans des conditions déterminées de profil et de profondeur.

C) Loi de similitude. — Les 2 aciers examinés au cours de ce chapitre, comme les métaux du chapitre précédent, n'ont subi que des recuits ; leur état physique et mécanique intime, est donc, d'un point à l'autre, aussi homogène que possible, et doit se prêter, dans les conditions les plus favorables, à la vérification de la loi de similitude.

Reprenons donc les résultats que nous venons d'exposer et groupons les de façon à rapprocher

les travaux de rupture des gros et des petits barreaux.

Désignation des métaux	Travaux de rupture		Rapport $\frac{T_c}{\theta_c}$
	barreaux de $30 \times 30 \times 160$ T_c	barreaux de $10 \times 10 \times 53,3$ θ_c	
	kgm.	kgm.	
Métal 357. . .	$4,21 \pm 0,32$	$0,19 \pm 0,03$	22,1
Métal 55 E . .	$10,43 \pm 0,00$	$1,06 \pm 0,13$	9,8

TABLEAU XXXIII

Pour l'alliage à 3 % de silicium, le rapport $\frac{T_c}{\theta_c}$ est très élevé, voisin de celui qui a été trouvé pour le métal extra-doux traité (voir tableau XVI page 43); cet alliage suit donc la loi commune; les résiliences sur petites éprouvettes sont beaucoup plus faibles que les résiliences sur gros barreaux.

Par contre, pour l'acier extra-doux à gros grain, on constate que le rapport $\frac{T_c}{\theta_c}$ se rapproche singulièrement du nombre 9 fixé par la loi de similitude. Ce résultat présente, évidemment, un certain intérêt, mais sur lequel il n'y a pas lieu d'insister; cette exception curieuse ne suffit, en effet, en aucune façon, à donner une valeur quelconque à la loi de similitude, à laquelle on peut persister à refuser tout caractère de généralité.

Nous n'avons évidemment pas à comparer dans le cas de l'extra-doux à gros grains, les résul-

tats des 2 épreuves par sollicitations vive ou lente, dont les deux mécanismes sont totalement différents. Mais nous pouvons chercher, indépendamment de toute idée de déduction relative au choc, comment se comportent, l'un par rapport à l'autre, les essais par action progressive, sur gros et petit barreaux. L'examen des diagrammes correspondants, figures n^{os} 48 et 54) montre que les travaux absorbés au cours des expériences peuvent être répartis comme l'indique le tableau XXXIV.

Ce tableau, joint à la considération des diagrammes, fait ressortir que les gros et les petits barreaux se comportent chacun d'une façon très particulière. Les travaux de rupture T_l et θ_l sont bien dans un rapport (11) voisin du nombre 9 qu'exige la vérification de la loi de similitude; mais, tandis que, pour les barreaux de 30×30 , le travail absorbé en période de fissilité $T_l - T_1$ n'est que le dixième du travail de rupture total T_l , pour les petits barreaux, la différence $\theta_l - \theta_1$ représente la moitié de la valeur globale θ_l .

Il semble donc que ce ne soit que par hasard, dans le cas particulier envisagé actuellement, que le rapport des travaux de rupture sur gros et petit barreaux se rapproche du nombre 9.

Comme conclusion, nous pouvons dire que les valeurs des résiliences de l'acier extra-doux cristallisé à gros grains, sur gros et petits barreaux semblables, tendent à vérifier la loi de similitude; mais ce résultat doit être considéré comme accidentel et ne suffit aucunement à donner à la loi le plus petit caractère de généralité.

Désignation du métal	Barreaux de 30 × 30 × 160			Barreaux de 10 × 10 × 53,3			Rapports		
	Travaux absorbés			Travaux absorbés					
	à la tangente horizontale T ₁	après la tangente horizontale T _l -T ₁	par la rup- ture T _l	à la tangente horizontale θ ₁	après la tangente horizontale θ _l -θ ₁	par la rup- ture θ _l	$\frac{T_l}{\theta_l}$	$\frac{T_1}{\theta_1}$	$\frac{T_l-T_1}{\theta_l-\theta_1}$
Acier 55 (E ou H)	kgm. 36,60	kgm. 4,35	kgm. 40,95	kgm. 1,91	kgm. 1,80	kgm. 3,71	11,0	19,1	2,4

TABLEAU XXXIV

TROISIÈME PARTIE

CONCLUSIONS

« Est-ce au choc, est-ce à l'entaillage, est-ce à l'ensemble du choc et de l'entaillage, qu'est due la mise en évidence de la fragilité? » C'est à cette question générale, objet immédiat de nos recherches, que nous devons répondre avant de procéder à l'examen des résultats secondaires que nos expériences paraissent avoir fait ressortir.

Nécessité de recourir à l'entaillage et au choc simultanément pour déceler la fragilité. — Si l'on étudie les aciers d'emploi courant, dans les conditions où les constructeurs devraient normalement les utiliser (trempés et revenus), on reconnaît que la variation de la vitesse d'impact et la variation du diamètre de l'entaille ont une influence nettement marquée sur les travaux absorbés par la rupture des barreaux d'essai ; d'une part, en effet, la résilience baisse de 5 à 20 % (barreau de $30 \times 30 \times 160$, entaillé à mi-épaisseur, au diamètre de 4 mm.), lorsque la vitesse du couteau, au moment où il vient en contact avec le barreau, passe de 9 m. par seconde à 60 mm. à l'heure environ (1) ; d'autre part, la résilience diminue de 10 à 30 % de sa valeur,

quand le diamètre de l'entaille (barreau de $10 \times 10 \times 53,3$, entaillé à mi-épaisseur) passe de 4 mm. à 1,3 mm., toutes autres choses restant égales.

Les variations de la vitesse d'impact et du diamètre de l'entaille marquent également dans les essais portant sur des aciers courants, mais considérés à l'état de recuit normal, c'est-à-dire après un réchauffage non prolongé à une température dépassant de 50 à 75° le point de recalcination (refroidissement lent) ; toutefois, pour ce nouvel état du matériel, l'influence de la vitesse paraît avoir changé de sens, les travaux de rupture par action lente étant quelque peu supérieurs aux travaux de rupture par choc.

L'action des 2 facteurs étudiés sur les résultats de l'épreuve au choc est donc nettement mise en évidence par l'observation attentive des faits ; il conviendrait, cependant, de la tenir, *pratiquement*, pour négligeable, si l'on se bornait à faire intervenir les alliages ferreux mis en œuvre dans les conditions physiques définies ci-dessus. Nous opérons, en effet, entre des limites très éloignées dont la plus basse est franchement anormale, puisque les vitesses généralement réalisées sur les appareils de choc sont comprises, pour l'ensemble des 2 barreaux, entre 5 et 9 m. par seconde. D'autre part, la précision que nous réalisons dans nos expériences, et qui est nécessaire

(1) Résultats analogues sur éprouvettes de 10×10 ; mais le gros barreau paraît mieux approprié aux expériences de démonstration, parce que les hétérogénéités locales accidentelles ont moins d'influence sur les déterminations.

pour éviter l'accumulation des essais (loi des grands nombres), n'a pas lieu d'être recherchée à l'atelier, et les écarts sur lesquels nous basons nos observations n'apparaîtraient pas de façon sensible dans ces conditions. Enfin, ce qu'on demande aux essais, dans les laboratoires industriels, c'est, pour des métaux différents, un classement relatif des uns par rapport aux autres et, pour un même métal, une différenciation nette des divers états sous lesquels on peut l'employer ; or, la variation, ni de la vitesse, ni de l'entaillage, ne trouble la succession des métaux examinés, si on les range, après chaque groupe de déterminations, dans l'ordre de leurs résiliences ; il est donc légitime de conclure que, pour les aciers couramment employés dans la construction, traités ou recuits normalement, l'influence de la vitesse et celle de l'entaillage sont pratiquement négligeables.

Mais le métal extra-doux, amené par recuits prolongés successifs à présenter une cristallisation volumineuse, vient renverser complètement cette manière de voir, en se présentant comme doué d'une sensibilité toute spéciale à l'influence des 2 facteurs considérés. Toutes autres choses restant égales, en effet, que l'on fasse, dans l'essai sur barreaux de 30×30 , varier la vitesse d'impact de 8,82 m. par seconde (hauteur de chute maxima) à 2,70 m. (mise en jeu de l'énergie juste nécessaire pour amener la rupture) et l'on voit la résilience doubler de valeur ; que l'on passe à l'épreuve par action lente, et le nombre de résilience croît jusqu'à prendre une valeur quadruple de la première. De telle sorte que la sollicitation vive à grande vitesse classe l'extra-doux à gros grains nettement derrière tous les métaux examinés jusqu'ici, tandis que la sollicitation lente le classe devant le cuivre à 1,25 % d'oxydure, devant le chrome-nickel dur recuit, et dans le voisinage immédiat du chrome-nickel dur traité. Ces résultats obtenus sur barreaux de 30×30 (entaille à mi-épaisseur, au diamètre de 4 mm.) et confirmés sur éprouvettes de 10×10 (entaille à mi-épaisseur au diamètre de 1,3 mm.), montrent que l'entaillage seul, même sé-

vere, n'est pas susceptible de mettre en évidence la fragilité, et qu'il est nécessaire de faire intervenir des conditions de vitesse.

La variation du diamètre de l'entaille, toutes autres choses restant égales, conduit à des observations tout à fait analogues. La résilience sur éprouvettes de $10 \times 10 \times 53,3$ (entaillées à mi-épaisseur) augmente de 1,66 kgm. à 11,88 kgm., lorsque le diamètre de l'entaille passe de 1,3 mm. à 4 mm. Dans le premier cas, l'extra-doux à gros grains paraît plus fragile que tous les métaux examinés jusqu'ici ; dans le second cas, il apparaît plus résilient non seulement que le chrome nickel dur recuit, mais encore que cet acier traité, et même il se rapproche des aciers mi-dur et mi-dur au nickel dont les résiliences, sur entaille de 4 mm. de diamètre, atteignent 13,5 kgm. environ.

Cette exception unique, mais il peut y en avoir d'autres, suffit à imposer la modification complète du point de vue auquel l'étude des métaux traités pour emplois usuels nous avait conduit ; et nous devons conclure que, pour conférer à ses résultats la sécurité indispensable, l'essai de flexion sur entaille doit être exécuté par choc et dans des conditions déterminées de vitesse et d'entaillage.

Conditions à réaliser par la vitesse et l'entaillage pour déceler la fragilité. — Si l'on se rappelle que la résilience ne fait que doubler, pour l'acier extra-doux à gros grains essayé sur barreaux de 30×30 quand on passe de la vitesse de 8,82 m. à la vitesse de 2,70 m., et que l'augmentation du travail absorbé par la rupture se manifeste surtout au voisinage de cette vitesse de 2,70 m. au-dessous de laquelle le barreau ne casse pas, il semble inutile de faire intervenir à ce point de vue des conditions différentes de celles que la pratique a consacrées pour la majorité des types de moutons ; soit 8 à 9 m. (correspondant à une hauteur de chute de 3 ou 4 m.) pour les barreaux de 30×30 et 5 à 6 m.

(correspondant à une hauteur de chute de 1,50 m. à 2 m.) pour les barreaux de 10×10 (1).

La série des résultats que nous avons présentés permet de régler facilement la question de l'entailage, tout au moins en ce qui concerne les types examinés ; il suffit de s'imposer l'élimination des types qui paraissent fournir des résultats soit incertains, soit erronés.

A ce point de vue, le trait de scie à 3 mm. de profondeur (ou 1 mm. de profondeur sur barrettes de 10×8) semble devoir être écarté, ainsi que toutes entailles rondes non profondes (n'atteignant pas la moitié de l'épaisseur du barreau).

Il ne faut retenir, en conséquence, que les entailles rondes à mi-épaisseur et les entailles aigües.

Pour les entailles rondes, le diamètre doit en être aussi voisin que possible de 1,3 mm., dans le cas des éprouvettes de 10×10 ; il peut atteindre 2 mm., mais ne doit jamais dépasser ce maximum. Par analogie, on peut admettre 4 mm. dans le cas des barreaux de 30×30 .

Quant à l'entaille aigüe, en V, standardisée en Angleterre (profondeur de 2 mm., angle du V $= 45^\circ$, arrondi terminal de 0,25 mm. de rayon), elle décèle la fragilité avec autant de sécurité que l'entaille de Copenhague ; et même, pour l'acier extra-doux à gros grains étudié, les deux types fournissent des résiliences identiques. Mais ce profil ne nous paraît pas devoir être retenu, pour les raisons d'ordre divers que nous avons exposées au cours de ce travail (voir page).

Ce sont donc les types proposés par M. Charpy et recommandés par le Congrès de Copenhague, que nous sommes conduit à préconiser, sous réserve d'une légère modification éventuelle du diamètre de l'entaille, pour le petit barreau.

Mécanismes de rupture. — Nous avons été amené à classer les métaux étudiés en deux catégories ; ceux pour lesquels l'influence de la vitesse sur les résultats de l'essai de choc est pra-

tiquement négligeable (métaux traités pour emplois usuels ou recuits normalement) et ceux pour lesquels cette influence est prépondérante (cas exceptionnel : acier extra-doux à gros grains).

Considérons d'abord le cas général.

Nous constatons que les phénomènes successifs constituant l'essai de flexion sur entaille sont les mêmes dans les 2 modes de sollicitation, vive ou lente ; nous en déduisons qu'il est légitime, dans ces conditions, d'analyser le mécanisme du choc par analogie avec le mécanisme de l'épreuve par action lente.

Nous distinguons ainsi, dans la suite des déformations aboutissant à la rupture du barreau, 3 périodes principales.

Dans toute l'étendue de la première, qui peut être désignée sous le nom de période d'élasticité et qui correspond aux plus faibles valeurs des travaux absorbés, le barreau ne subit pas de déformations permanentes.

La deuxième période commence avec les déformations permanentes et s'arrête au moment de l'apparition d'une légère crique au fond de l'entaille, apparition qui coïncide avec l'imposition de la charge maxima mise en jeu au cours de l'épreuve par action lente.

La troisième période, dite de fissilité, s'étend depuis le moment où la fissure s'amorce au fond de l'entaille jusqu'à la fin de l'essai ; son importance relative varie considérablement, d'un acier à l'autre, et permet de classer les métaux, dans un ordre particulier, différant de celui que l'essai de traction met en évidence (limites d'élasticité et de rupture), différant aussi de celui qui résulte de la considération des résiliences. C'est ainsi que, de ce point de vue, l'acier extra-doux, le chrome-nickel dur et le cuivre sont rapprochés les uns des autres, malgré l'écart considérable que présentent leurs travaux de rupture. D'autre part, pour les métaux courants recuits ou trempés sans revenu suffisant (état fragile dans un cas comme dans l'autre), la période de fissilité tend à diminuer et même à disparaître.

Dans le cas exceptionnel de l'acier extra-doux à gros grains, les résultats globaux des deux

(1) Le mouton Izod, standardisé en Angleterre présente une hauteur de chute notablement plus petite, qui doit, dans le cas de l'extra-doux à gros grains, conduire à des résultats erronés.

modes de sollicitation sont tout à fait différents ; il semble toutefois que l'on puisse encore trouver une partie commune aux deux suites de phénomènes, malgré leur dissemblance apparente. Par analogie avec les déterminations auxquelles l'alliage à 3 % de silicium donne lieu, il est normal d'admettre que l'épreuve au choc se réduit à la période élastique et à une fraction de la période de déformations permanentes, tandis que l'épreuve progressive comporte les trois phases reconnues antérieurement, la phase de fissilité prenant une valeur relative très petite et décelant par là-même la fragilité du matériel. La discontinuité entre les deux apparences n'est d'ailleurs due qu'à l'écart considérable entre les deux valeurs de la vitesse qu'on fait intervenir (dans le rapport de 10^5 à 1). Si, en effet, on considère l'influence du diamètre de l'entaille, dont la variation produit les mêmes effets que la variation de la vitesse, on constate qu'on passe insensiblement, même au choc, de la cassure sèche à la cassure fortement strictionnée, observation qui légitime le raisonnement par analogie, exposé ci-dessus.

L'interprétation de ces phénomènes paraît justiciable de l'hypothèse de MM. Stead et Henry Le Chatelier, relative aux cassures inter et intra cristallines. Nous avons cherché, mais sans y réussir à contrôler directement ce point de vue, et la vérification détournée nous a paru devoir entraîner un nombre trop considérable d'expériences, pour qu'elle puisse rentrer dans le cadre de ce travail. En tout état de cause, on ne voit pas clairement comment s'opère ce passage progressif d'un mode de rupture à l'autre, par la simple variation d'un élément aussi indépendant de la matière elle-même que le diamètre de l'entaille.

Loi de similitude. — Les deux types de barreaux rigoureusement semblables mis en œuvre pour l'étude de la vitesse d'impact et de l'entaillage nous ont permis d'examiner, chemin faisant, la question de la loi de similitude. Nous avons constaté que cette loi n'était applicable ni

au cuivre, ni aux aciers traités pour emplois usuels, ni aux aciers recuits, ni à l'alliage à 3 % de silicium, et cela dans le cas de la sollicitation vive comme dans celui de la sollicitation lente.

Nous avons montré, en outre, qu'aucune des 3 phases entre lesquelles on peut de façon générale décomposer le phénomène de la flexion sur entaille, ne satisfait à la règle proposée. Bien plus, la période de fissilité se présente comme étant, proportionnellement, beaucoup plus développée dans l'essai sur barrettes de 10×10 que dans l'essai sur barreaux de 30×30 , la remarque inverse pouvant être faite pour l'ensemble des deux périodes aboutissant à la formation de la crique. Ces constatations heurtent évidemment, les manières de voir généralement admises en ces matières, et on voudrait trouver une interprétation plausible à ce régime d'exception. Il ne semble, cependant, normal d'incriminer, ni les machines de choc elles-mêmes, puisque les types les plus divers fournissent des résultats très comparables entre eux, ni la pénétration plus ou moins complète du métal par les traitements, puisque les aciers recuits et le cuivre se comportent comme les aciers trempés et revenus. Il faut donc admettre que le mécanisme des déformations est déterminé, tout au moins en partie, par les dimensions des éprouvettes, même dans le cas où le phénomène se présente comme assez étroitement relié aux caractéristiques de l'essai de traction.

Seul l'acier extra-doux à gros grains offre une concordance vraiment satisfaisante entre ses résiliences sur gros (20,36 kgm.) et sur petit (2,12 kgm.) barreaux ; mais ce métal est, par lui-même, trop anormal pour qu'on puisse en faire état.

Nous devons donc conclure que la loi de similitude, qui rend compte si exactement des essais de flexion ordinaire, n'est pas de façon générale applicable aux essais de flexion sur entaille.

Fragilité et fissilité. — La considération de la fissilité s'est naturellement introduite dans l'analyse de l'épreuve étudiée ; mais il semble

qu'on puisse aller plus loin et s'adresser à cette notion pour préciser, la définition, assez vague encore à l'heure actuelle, de la fragilité. Dans cet esprit, nous suggérons de caractériser l'état « non fragile » d'un matériel, soit par une résilience élevée, soit, en cas de résilience moyenne, par une faible fissilité. On dirait, par exemple, qu'un métal, quoique peu résilient, n'est pas fragile, lorsque le travail absorbé au cours de la période de fissilité (essai, par action lente, d'un barreau de 30×30 , entaillé circulairement au rayon de 4 mm.) représente une fraction suffi-

sante, la moitié ou le tiers, du travail total de rupture.

En terminant, nous nous permettons d'exprimer nos respectueux remerciements à M. Léon Lévy, Directeur Général de la Compagnie des Forges de Châtillon, Commentry et Neuves-Maisons, qui a bien voulu nous autoriser à entreprendre nos expériences dans les Laboratoires des Usines Saint-Jacques, à Montluçon, et à en publier les résultats.



DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

*Méthodes de dosage des gaz dans les aciers : hydrogène, oxygène
et azote.*

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 25 Mars 1920

P. le Doyen de la Faculté des Sciences,

L'Assesseur :

G. LIPPMANN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

P. APPELL.

